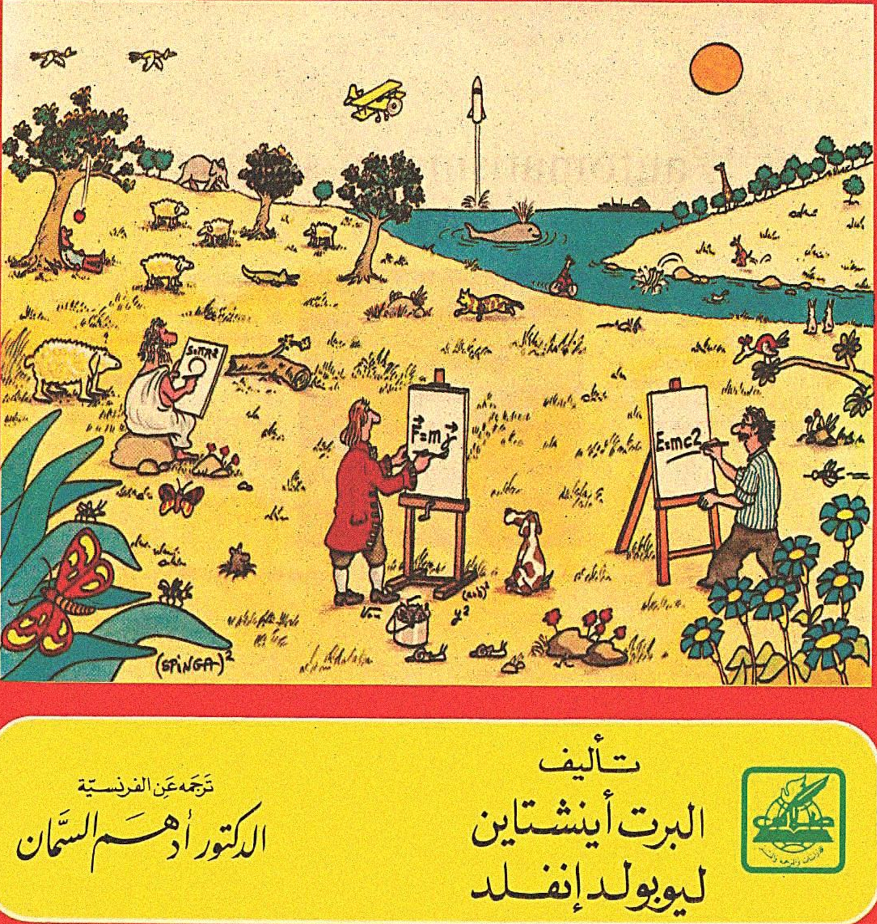
سلسلة الثقافة المميزة
3

تطوّر الأفكار في الفيزياء

من المفاهيم الأوليّة إلى نظريّتي النسبيّة والكمّ



تأليف
البرت أينشتاين
ليوبولد إنفلد

ترجمة عن الفرنسيّة
الدكتور أدهم السمّان

بسم الله الرحمن الرحيم

دار طلاس

للدراسات والترجمة والنشر

دمشق - اوتستراد المزة. ص.ب: ١٦٠٣٥

هاتف : ٦٦١٨٠١٣ - ٦٦١٨٩٦١

تلفاكس : ٦٦١٨٨٢٠ - برقياً : طلاسدار

ريع الدار

لهيئة مدارس أبناء وبنات الشهداء في الجمهورية العربية السورية

تطور الأفكار في الفيزياء

من المفاهيم الأولية إلى نظريتي النسبية والكم

صدر هذا الكتاب بالتعاون مع المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا بدمشق

الطبعة الثانية - ١٩٩٩

تأليف

البرت أينشتاين ليوبولد إنفلد

تطوّر الأفكار في الفيزياء

من المفاهيم الأوليّة إلى نظريّتي النسبيّة والكمّ

ترجمه عن الفرنسيّة

الدكتور أدهم السمّان

أعمال الدكتور أدهم السمان المنشورة

المؤلفات

- **الضوء الهندسي** : منشورات جامعة دمشق .
- **الكهرطيسية** : منشورات جامعة دمشق .

المترجمات

- **الأرض والسماء** : تأليف أ . فولكوف ، منشورات وزارة الثقافة والإرشاد القومي ، دمشق .
- **طبيعة قوانين الفيزياء** : تأليف ر . فاينمان ، طبعة ثانية ، منشورات مؤسسة الرسالة بدمشق .
- **هكذا أرى العالم** : تأليف أ . أينشتاين ، منشورات وزارة الثقافة والإرشاد القومي ، دمشق .
- **الطبيعة في الفيزياء المعاصرة** : تأليف ف . هايزنبرغ ، منشورات دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر ، دمشق .
- **فيزياء وفلسفة** : تأليف ف . هايزنبرغ ، طبعة ثانية مزيدة ، منشورات مؤسسة الرسالة ، بيروت .
- **تطور الأفكار في الفيزياء** : تأليف أ . أينشتاين ول . إنفلد ، الطبعة الأولى ، منشورات وزارة الثقافة والإرشاد القومي ، دمشق .
- **المكان والزمان في العالم الكوني الحديث** : تأليف ب . ك . و . ديفيس ، منشورات مؤسسة الرسالة ، بيروت .
- **موجز تاريخ الزمن** : تأليف ستيفن هوكين ، منشورات دار طلاس للدراسات والترجمة والنشر ، دمشق .

بسم الله الرحمن الرحيم

عنـوان الكتـاب باللغـة الافـرنسيـة

L'ÉVOLUTION DES IDÉES EN PHYSIQUE

مقـــدمـــة

إنكم ، قبل قراءة هذا الكتاب ، تنتظرون وبحق أن نجيبكم عن سؤالين بسيطين : لماذا كتبناه ؟ وأي القراء يستهدف ؟

يصعب علينا أن نجيب ، منذ البداية وبكلام بسيط ومقنع ، عن هذين السؤالين . وقد يكون من الأسهل أن نفعل ذلك عندما نصل إلى نهاية الكتاب ، لكن الجواب يصبح عندئذٍ تحصيل حاصل . وعلى هذا نجد من الأبسط أن نقول بالتدقيق ما لا يدعي هذا الكتاب أن يكون . إننا لانؤلف هنا كتاباً في الفيزياء ، ولن تجدوا فيه دروساً منهجية نشرح فيها الوقائع والنظريات الفيزيائية الأولية . لكننا نتقصد أن نرسم بالخطوط العريضة محاولات الفكر البشري في إيجاد الصلة بين عالم الأفكار وعالم الظواهر . وقد جهدنا في إبراز الدوافع القوية التي تجبر العلم على اختراع أفكار تتصل بواقع العالم الذي نعيش فيه . لكن عرضنا يجب أن يكون بسيطاً . فمن خلال متاهة الوقائع والمفاهيم عمدنا إلى اختيار طريق عام ، هو الطريق الذي بدا لنا أكثر تميزاً وأعمق مغزى من سواه . أما الوقائع والنظريات التي لايمر بها هذا الطريق فقد أهملناها بالضرورة . وقد اضطررنا ، بسبب هدفنا العام ، أن نقوم بعملية اختيار محدد للوقائع والأفكار . فأهمية الموضوع لاتقاس بعدد الصفحات التي تكرس له . وقد أعرضنا

عن بعض خطوط الفكر الجوهرية ، لا لأننا نعتبرها عديمة الأهمية ولكن لأنها لاتقع على الطريق الذي اخترناه .

وعندما كنا نكتب هذا الكتاب كنا نتناقش طويلاً بخصوص أوصاف القارىء المستهدف ، واهتممنا به إلى أبعد حد . وقد كنا نرى أن يتدارك النقص الكلي في معارفه الملموسة في الفيزياء والرياضيات بمجموعة كبيرة من المزايا . فقد وجدناه مولعاً في أن يهتم بالأفكار الفيزيائية والفلسفية ؛ ورأينا أنفسنا مضطرين للإعجاب بالصبر الذي يتسلح به كي يتفهم المقاطع الأقل أهمية والأكثر صعوبة . وهو يشعر بأن فهم صفحة معينة يستلزم أن يكون قد قرأ بعناية الصفحة التي سبقتها ، ويعرف أن الكتاب العلمي ، ولو كان متميزاً بالتبسيط ، يجب أن لا يُقرأ كما تُقرأ الرواية .

إن هذا الكتاب هو حوار بسيط بينكم وبيننا ؛ ونترك لكم الحكم عليه : هل هو ممل أم جذاب ؟ باهت أم مثير ؟ ونكون قد بلغنا هدفنا إذا أتيح لهذه الصفحات أن تعطيكم فكرة عن الكفاح المتواصل الذي يبذله الفكر البشري الخلاق كي يتوصل بشكل كامل لفهم القوانين التي تحكم الظواهر الفيزيائية .

ألبرت آينشتاين وليوبولد إنفلد

الفصـــل الأول

نشــوء الصـورة الميكـانيكيـة

حكـايـة الأســرار العظيمـة ــ الخط الموجه الأول ــ الأشعـة ــ لغز الحركة ــ بقي درب ــ هل الحرارة هيولة ؟ ــ الجبال الروسية ــ نسبة القيمتين ــ الخلفية الفلسفية ــ النظرية الحركية للمادة .

حكـايـة الأسـرار العظيمـة

في مجال الخيـال يوجد حكـاية مثـاليـة ذات أسـرار . وهذه الحكـاية رواية تتمتع بجميع الأوصاف الجوهرية وتحدو بنا لأن نبني بأنفسنا نظرية للمسألة الراهنة . وإذا تتبعنا خيوط حبكتها بانتباه نتوصل بأنفسنا إلى الحل الكامل قبل أن يكشفه لنا الراوي في نهاية الحكاية . وهذا الحل ، بعكس حلول الأسرار ذات المستوى التافه ، لايخيب أبداً ؛ وهو ، بالإضافة إلى ذلك ، يتكشف في الموعد الذي ننتظره .

هل يمكن أن نشبه قارىء مثل هذه الرواية برجال العلم الذين يواصلون البحث ، جيلاً بعد جيل ، عن حلول الأسرار الكامنة في كتاب الطبيعة ؟ إن هذه المقارنة مغلوطة ولابد من التخلي عنها في نهاية الأمر . لكنها تتضمن مع ذلك قسطاً من الصواب ؛ ويمكن أن نتوسع فيها **وأن نعدلها بحيث نجعلها** أكثر انسجاماً مع المجهود الذي يبذله العلم في سبيل اكتشاف سر العالم .

إن هذه الحكاية ذات الأسرار لم تجد بعد حلاً . ونحن لسنا على يقين من أنها تتضمن حلاً نهائياً . لكن قراءتها قد عرفتنا الشيء الكثير ؛ فقد علمتنا أوليات لغة الطبيعة وجعلتنا قادرين على

اكتشاف دروب عديدة وكانت مصدر متع ونشوات أثناء السير في طريق العلم المتعب في غالب الأحيان . ولكننا ندرك ، برغم كل الروايات التي قرأناها وفهمناها ، أننا ما نزال بعيدين عن الحل الكامل ، إذا كان يوجد حل كامل . ونحن في كل مرحلة ، نجتهد في أن نجد تفسيراً ينسجم مع الصلات المكتشفة في المراحل السابقة . ولدينا اليوم نظريات ، مقبولة على سبيل التجريب ، تفسر كثيراً من الوقائع ولكننا لم نتمكن بعد من تطوير أي حل عام كي **ينسجم** مع كل العلاقات المكتشفة . وكثيراً ما نكتشف أن نظرية ، كاملة في ظاهرها ، يتجلى عجزها في قراءة جديدة ، حيث تبرز وقائع جديدة تناقضها أو تستعصي عليها . وكلما أمعنا في القراءة يزداد إعجابنا بكمال بناء الرواية بالرغم من شعورنا بأن الحل الكامل يتراجع أمامنا كلما اقتربنا منه .

في كل الروايات البوليسية تقريباً ، منذ حكايا كونان دويل الرائعة ، يصل المحقق إلى نقطة تتجمع عنده فيها كل الوقائع التي يحتاجها ليصل على الأقل إلى مرحلة ما من الحل . وهذه الوقائع تبدو في غالب الأحيان ، غريبة ومفككة وعديمة الصلة فيما بينها . ولكن المحقق الماهر يشعر ، في ذلك الوقت ، أن لاضرورة للاسترسال في التحقيق وأن إعمال الفكر وحده يمكن أن يوجد صلة فيما بين الوقائع المجتمعة لديه . وهكذا يروح يعزف على كمانه أو يضطجع مسترخياً في أريكته وغليونه في فمه ثم ... ، يا للدهشة ! لقد وجدها . وهو لم يجد فقط الصلة بين شتى الخيوط التي في يده ولكنه يعلم أيضاً أن حوادث أخرى لابد حدثت . وبما أنه يرى الآن أين يجب أن يوجه بحوثه يمكن أن يخرج ، إذا لزم الأمر ، ليبحث عن أدلة أخرى لنظريته .

ورجل العلم الذي يقرأ كتاب الطبيعة ، إذا جاز لنا أن نكرر هذه الجملة المعادة ، يجب أن يجد الحل بنفسه ؛ فهو لايستطيع أن يذهب ، كما يفعل قراء الرواية المتعجلون ، إلى الصفحات الأخيرة من الكتاب . فالقارىء ، في حالتنا هذه ، هو المحقق في الوقت ذاته وهو الذي يحاول أن يجد ، ولو جزئياً ، العلاقات فيما بين الحوادث الغنية في تشابكها . والحصول على حل ، ولو جزئي ، يتطلب من رجل العلم أن يجمع شتات الوقائع التي يتوصل إليها وأن يرتبها بشكل متماسك **يجعلها مفهومة** لدى الفكر الخلاق .

إن هدفنا ، في الصفحات التالية ، هو أن نشرح بشكل عام إنجاز الفيزيائيين الذي يتصل بالفكر البحت للباحث . وسنهتم أساسياً بالدور الذي لعبته الأفكار والمحاكات في هذه المغامرة التي تكمن في السعي إلى معرفة العالم الفيزيائي .

الـخـط الـمـوجـه الأول

إن محاولات قراءة الرواية العظيمـة ذات الأسـرار تعود في قدمها إلى قدم الفكر البشري نفسه . لكن العلماء لم يبدأوا فهم لغة هذه الرواية إلا منذ ثلاثمئة سنة . فمنذ هذا الوقت ، وهو عصر غاليله ونيوتن ، خطت هذه القراءة خطى سريعة . فقد تطورت ، خلال هذه الحقبة ، وسائل التحقيق والطرق المنهجية في سبيل اكتشاف الخطوط الموجهة والاستهداء بها . وقد أمكن حل بعض ألغاز الطبيعة ، بالرغم من أن كثيراً من هذه الحلول قد اتضح ، في ضوء أبحاث لاحقة ، أنها كانت وقتية وسطحية .

كانت قضية الحركة المسألة الأساسية ؛ وكانت تزداد غموضاً خلال آلاف السنين بسبب تعقداتها . إن كل الحركات التي نلاحظها في الطبيعة ، كالحجر المقذوف في الهواء والسفينة التي تمخر عباب البحر والعربة التي تدرج في الشارع ، حركات معقدة جداً في الواقع . ولكي نفهم هذه الظواهر يحسن أن نبدأ بأبسطها وأن ننتقل بالتدريج إلى المعقد منها . لنتأمل في جسم بحالة سكون ، حيث لانحس له بأية حركة . فلكي نغير مكان هذا الجسم لابد من أن نخضعه لتأثير ما : أن ندفعه أو أن نرفعه أو أن نسلط عليه أجساماً أخرى ، أحصنة أو آلات بخارية . فلدينا حدس يقول بأن الحركة تتصل بأفعال الدفع أو الرفع أو الجر . وتقودنا تجارب عديدة إلى أن نغامر بالمقولة الأخرى التالية : إذا أردنا للجسم أن يتحرك بسرعة أكبر يجب أن ندفعه بشدة أكبر . ويبدو من الطبيعي أن نستنتج أنه كلما كان الفعل المسلط على الجسم أقوى كانت حركته أسرع . فالعربة التي يجرها أربعة أحصنة تتقدم بأسرع من العربة التي يجرها حصانان فقط . فالحدس البدهي يقول لنا إن الحركة مرتبطة جوهرياً بالفعل .

إن من المعروف جيداً لدى قراء الروايات البوليسية أن سلوك الدرب الخطأ يقود إلى اختلاط الأمور وابتعاد الحل . والمحاكمة التي تستند على الحدس وحده لم تكن صائبة دوماً وقد قادت إلى مفاهيم مغلوطة عن الحركة ، وقد اعتُمدت هذه المفاهيم خلال قرون عديدة . وربما كانت سلطة أرسطو في أوربا كلها هي السبب الأول في الاعتقاد الراسخ ، الذي كان يعتنقه الناس ، بصحة الحدس . ونحن نقرأ في أحد الكتب المنسوبة إليه خلال قرنين :

إن الجسم المتحرك يتوقف عن الحركة عندما لاتعود القوة التي تدفعه قادرة على التأثير بشكل يدفعه .

إن المحاكمة العلمية ، التي اكتشفها غاليله واستخدمها ، هي من أهم إنجازات الفكر في

تاريخ البشر وهي نقطة الانطلاق الحقيقية في الفيزياء . وقد علّمنا هذا الاكتشاف أن لانركن دوماً إلى الحدس الذي يستند إلى الملاحظات العابرة لأنه يقود أحياناً إلى خطوط موجهة خادعة .

ولكن أين يكون الحدس خادعاً ؟ هل من الممكن ان يكون خطأً القول بأن العربة التي يجرها أربعة أحصنة يجب أن تتحرك بأسرع من العربة التي يجرها حصانان فقط ؟

لنفحص ، عن كثب ، الوقائع الأساسية للحركة انطلاقاً من الخبرة اليومية الشائعة لدى الناس منذ بدء الحضارة والمكتسبة من خلال الكفاح القاسي من أجل البقاء .

لنتأمل رجلاً يدفع أمامه سيارة على طريق منبسط مستقيم وأنه يتوقف فجأة عن الدفع . نلاحظ عندئذٍ أن السيارة تستمر في السير مسافة ما قبل أن تتوقف . ولنسأل : كيف يمكن أن نطيل هذه المسافة ؟ يمكن أن نفعل ذلك بوسائل عديدة ، بتشحيم العجلات مثلاً وبدحو الطريق ليصبح أحسن انبساطاً . فكلما كان دوران العجلات أسهل والطريق أحسن انبساطاً أصبح زمن استمرار السيارة في الحركة أطول . فما الذي نحصل عليه من تشحيم العجلات ومن دحو الطريق ؟ إن كل ما نحصل عليه هو التقليل من شأن التأثيرات الخارجية . فتأثير ما نسميه الاحتكاك قد نقص ، سواء في العجلات أو بينها وبين الأرض . وهذا هو منذ الآن تفسير نظري لواقعة جلية . وهو في حقيقته مصطنع . وبخطوة أخرى ذات مغزى ، على هذا الدرب ، نتوصل إلى خط موجه حقيقي . لنتصور أن الطريق أملس تماماً وأن العجلات عديمة الاحتكاك . تزول عندئذٍ أسباب توقف السيارة فتستمر ماضية في حركتها . وهذه نتيجة برزت من تصور تجربة مثالية لايمكن أن نحققها عملياً ، إذ يستحيل أن نحذف كل المؤثرات الخارجية . فالتجربة المثالية قد أبرزت الخط الموجه الذي يشكل بحق أساس ميكانيك الحركة .

إن مقارنة هاتين الطريقتين في سبيل الوصول إلى حل المسألة تبيح لنا أن نقول : إن الحدس البدهي يعلمنا **أن اشتداد الفعل الخارجي** يؤدي إلى تزايد السرعة . فالسرعة تنبيء إذن عن وجود أو عن عدم وجود قوى خارجية متسلطة على الجسم . فالخط الموجه الذي اكتشفه غاليله هو : إذا لم يكن الجسم مدفوعاً ولامجروراً ولاخاضعاً لأي فعل خارجي ، أو بمختصر القول : إذا لم تؤثر فيه أية قوة خارجية ، فإنه يتحرك بانتظام أي بسرعة ثابتة وفي خط مستقيم . فالسرعة لاتنبيء إذن عما إذا كان يوجد ، أم لا ، قوى خارجية تتسلط على الجسم المتحرك . والنتيجة الصحيحة التي استنبطها غاليله صاغها نيوتن بعد جيل من الزمان بالنص المعروف باسم **قانون العطالة** . وهو أول قانون فيزيائي نتعلمه عادة عن ظهر قلب في المدرسة . ولاشك أن بعضنا ما يزال يتذكره :

إن كل جسم يبقى على حالته من السكون أو من الحركة المنتظمة في خط مستقيم ، إلا إذا أجبر على تغيير هذه الحالة بواسطة قوى تتسلط عليه .

لقد رأينا أن قانون العطالة هذا لايمكن أن يُستمد من التجربة مباشرة ، بل وحصراً من المجهود الفكري المتلائم مع الملاحظة . فالتجربة المثالية لايمكن أن تتحقق عملياً إطلاقاً ، بالرغم من أنها هي التي تقود إلى فهم عميق للتجربة الواقعية .

ومن تنوع الحركات المعقدة التي تظهر في هذا العالم حولنا نختار ، كمثال أول ، الحركة المنتظمة . إنها أبسط الحركات بسبب غياب القوة الخارجية عنها . وبالرغم من ذلك فإن الحركة المنتظمة لايمكن أن تتحقق أبدا ؛ فالحجر الذي نتركه يسقط من قمة برج والسيارة الماضية في خط مستقيم لايمكنهما أن يتحركا بسرعة ثابتة تماماً لأننا غير قادرين على حذف تأثير كل القوى الخارجية .

وفي الرواية الجيدة ذات الأسرار تفضي الخطوط الموجهة الأكثر غرابة إلى شكوك لامبرر لها . وفي محاولاتنا لفهم قوانين الطبيعة نجد أيضاً أن التفسير الحدسي الكامل الوضوح يكون غالباً غير صحيح .

إن الفكر البشري يرسم للعالم الذي حولنا صورة تتغير باستمرار . والإسهام الذي قدمه غاليله محا الصورة الحدسية وأبدلها برؤية جديدة ؛ وهذا هو لب اكتشافه .

لكن مسألة أخرى ، بخصوص الحركة ، تبرز الآن : إذا لم تكن السرعة دليلاً على وجود قوى خارجية متسلطة على الجسم ، **فما هو الدليل إذن ؟** إن الجواب عن هذا السؤال الأساسي وجده غاليله وعبر عنه نيوتن بشكل دقيق ؛ وهو الخط الموجه الجديد في تحرياتنا .

إن البحث عن الجواب الصحيح يستلزم أن نتفكر بعمق أكثر في حالة السيارة التي تتحرك على طريق منبسط تماماً . ففي تجربتنا المثالية ينجم انتظام الحركة عن غياب القوى الخارجية . لنفترض الآن أننا أعطينا السيارة المتحركة بانتظام صدمة في اتجاه الحركة ؛ فماذا يحدث عندئذٍ ؟ من الواضح أن سرعتها تزداد . ومن الواضح أيضاً أن سرعتها تنقص إذا كانت الصدمة في عكس اتجاه الحركة . ففي الحالة الأولى تتسارع السيارة بفعل الصدمة ؛ وفي الحالة الثانية تتباطأ . وهكذا تبرز النتيجة التالية : **إن فعل القوة الخارجية يغيّر السرعة** . وهكذا يتجلى أثر الدفع أو الجر ، لا في السرعة ذاتها بل في تغير السرعة . فالقوة تزيد في السرعة أو تنقص منها حسبما تتجه في اتجاه الحركة

أو في عكسه . وقد رأى غاليله ذلك بوضوح وكتب في كتابه « علمان جديدان » ما يلي :

إن أية سرعة للجسم تنحفظ تماماً طالما بقيت الأسباب الخارجية للتسارع أو للتباطؤ غائبة ، وهو شرط لايتحقق إلا في المستوى الأفقي ؛ لأنه يوجد في المستوى اللا أفقي سبب للتسارع باتجاه النزول ، وسبب للتباطؤ باتجاه الصعود . ومن هذا ينتج أن الحركة على المستوى الأفقي متواصلة ؛ والسرعة ثابتة لعدم وجود سبب يضعفها أو يعدمها .

وباتباع الخط الموجه السديد نتوصل إلى فهم أعمق لمسألة الحركة . فالصلة بين القوة وتغير السرعة ـــ ولاصلة بين القوة والسرعة ذاتها ، أي بعكس ما يمكن أن يوحي به الحدس البدهي ـــ هي أساس الميكانيك التقليدي بالشكل الذي صاغ نيوتن نصه .

لقد استخدمنا هنا مفهومين يلعبان دوراً رئيسياً في الميكانيك التقليدي : القوة وتغير السرعة . وخلال التطور اللاحق للعلم توسع هذان المفهومان وتعمما . وعلى هذا الأساس لابد من فحصهما عن كثب .

ما هي القوة ؟ إننا نعرف بالحدس مدلول هذه الكلمة ؛ إن مصدر هذا المفهوم يكمن في المجهود الذي نبذله لكي ندفع جسماً أو نقذفه أو نجره ، أي في الإحساس العضلي الذي يصاحب كل عمل من أعمالنا . لكن تعميمه يذهب إلى أبعد من هذه الأمثلة البسيطة . فنحن يمكننا أن نتمثل القوة دون أن نتصور حصاناً يجر عربة . فنتكلم عن قوة التجاذب بين الشمس والأرض وبين الأرض والقمر ، وعن القوى التي تتسبب في حوادث المد والجزر . ونتكلم عن القوة التي تجبرنا بواسطتها الأرض على البقاء في منطقة تأثيرها ، وعن قوة الريح التي تثير أمواج البحر أو تهز أوراق الشجر . فإذا شعرنا ، في أية مناسبة ، بحدوث تغير في سرعة فلابد أن نقبل بتدخل قوى خارجية ، بمفهومها العام ، تتسبب في هذا التغير . ويقول لنا نيوتن في كتابه « المبادىء » ما يلي :

إن القوة المتسلطة هي فعل يتحكم في جسم كي يغير من حالة سكونه أو من حالة حركته المنتظمة في خط مستقيم .

إن هذه القوة تكمن في الفعل فقط ولاتبقى في الجسم عندما ينتهي الفعل . لأن الجسم يحتفظ بأية حالة جديدة يكتسبها ، وذلك من جراء عطالته الذاتية فقط . والقوى المتسلطة يمكن أن تتأتى من مصادر شتّى : الصدم أو الضغط أو القوة النابذة .

عندما نترك حجراً يسقط من قمة برج فإن حركته لاتكون منتظمة لأن سرعته تزداد كلما اقترب من الأرض . فنستنتج أن قوة خارجية تفعل في اتجاه الحركة أو ، بتعبير آخر ، أن الأرض

تجذب الحجر . لنضرب مثلاً آخر . ماذا يحدث للحجر إذا قذفنا به شاقولياً نحو الأعلى ؟ نرى أن سرعته تتناقص أثناء صعوده حتى يبلغ نقطة أوجه ثم يعود أدراجه هابطاً . إن تناقص السرعة هذا ناجم عن القوة ذاتها التي تسبب التسارع أثناء الهبوط . فالقوة تؤثر أثناء الهبوط في اتجاه الحركة ، وأثناء الصعود في عكسه . إن القوة واحدة ، لكنها تولد تسارعاً تارة وتباطؤاً تارة ثانية ، حسبما يتحرك الجسم من الأعلى للأسفل أو من الأسفل للأعلى .

الأشعة

إن كل الحركات التي فحصناها حركات مستقيمة ، أي تحدث على خط مستقيم . علينا الآن أن نتوغل على هذا الدرب . فنحن نتوصل إلى فهم قوانين الطبيعة عندما نتفحص الحالات الأكثر بساطة ونتجنب ، في محاولاتنا الأولى ، التعقيدات المتشابكة . والخط المستقيم أبسط من الخط المنحني . لكننا يستحيل علينا أن نكتفي بفهم الحركة المستقيمة . إن حركات القمر والأرض والكواكب ، أي الأجرام التي انطبقت على حركاتها مبادىء الميكانيك بنجاح باهر ، هي حركات ترسم خطوطاً منحنية . هذا وإن الانتقال من الحركة المستقيمة إلى الحركة المنحنية تعترضه صعوبات جديدة ؛ وعلينا أن نتسلح بالشجاعة لمجابهتها إذا أردنا أن نفهم مبادىء الميكانيك التقليدي التي رسمت لنا أول خط موجه وكانت نقطة الانطلاق في تطور العلم .

لنفكر في تجربة مثالية أخرى : كرة ملساء تماماً تتدحرج بانتظام على طاولة ملساء . نعلم أننا إذا أعطينا الكرة صدمة ، أي إذا سلطنا عليها قوة خارجية قصيرة الأمد ، فإن سرعتها تتغير . لنفترض الآن أن منحى الصدمة ليس في خط الحركة ـــ أي بعكس ما فعلناه في السيارة ـــ بل في خط آخر تماماً ، ولنقل عمودياً على خط الحركة . فماذا يحدث للكرة ؟ لنفحص ، كلاً على حدة ، أطوار الحركة الثلاثة : الحركة الأولية قبل الصدمة ، فعل قوة الصدم ، الحركة النهائية بعد أن يتوقف فعل القوة الصادمة . إن قانون العطالة ينبئ أن سرعتي الكرة ، قبل تسلط قوة الصدم وبعده ، منتظمتان تماماً . لكن فرقاً يحدث بين حركتي الكرة هاتين ، وهو تغير خط الحركة (أو نقول تغير منحاها) من جراء قوة الصدم . إن خط الحركة الأولي ومنحى الصدمة متعامدان . لكن منحى الحركة النهائي لاينطبق على أي منهما ، بل هو خط يقع بينهما ، وهو أقرب إلى منحى القوة إذا كانت الصدمة شديدة والسرعة الأولية ضعيفة ، وأقرب إلى منحى الحركة الأولي إذا كانت الصدمة ضعيفة والسرعة البدئية كبيرة . وهكذا نتوصل إلى نتيجة جديدة لقانون العطالة هي : إن فعل القوة

الخارجية ، عموماً ، لايغير السرعة فقط بل يغير أيضاً منحى الحركة . إن إدراك هذا الواقع الجديد يمهد للتعميم الذي طرأ على الفيزياء مع مفهوم الشعاع .

يمكننا أن نسترسل في استخدام طريقتنا في المحاكمة المباشرة . ونقطة الانطلاق هي ، من جديد ، قانون العطالة لغاليله . فنحن لم نستنفذ بعد كل نتائج هذا الخط الموجه الثمين في لغز الحركة .

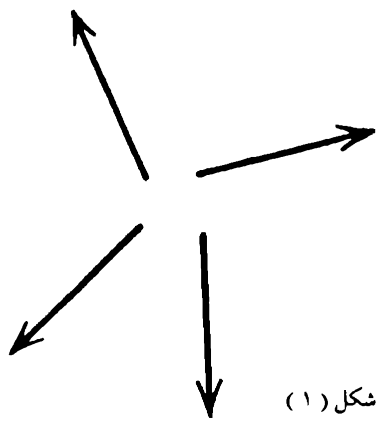
لنتفكر في كرتين تتحركان على طاولة ملساء في اتجاهين مختلفين . ولكي نحصل على صورة محددة يمكن أن نفترض أن اتجاهيهما متعامدان . وبما أنه لايوجد أية قوة تؤثر فيهما فإن كلاً من الحركتين تكون منتظمة تماماً . لنفترض ، فوق ذلك ، أن السرعتين متساويتان ، أي أنهما تقطعان مسافتين متساويتين في فترة زمنية واحدة . ولكن هل من الصحيح أن نقول إن للكرتين سرعة واحدة ؟ يمكن أن نجيب عن هذا السؤال بنعم أو بلا . إذا كانت إبرتا السرعة في سيارتين تشيران كلتاهما إلى ستين كيلومتراً في الساعة فمن الشائع أن نقول إن للسيارتين سرعة واحدة رغم اختلاف خطي سيرهما (منحيي حركتيهما) ، لكن العلم يتطلب أن نصوغ له لغة خاصة ومفاهيم خاصة به ، والمفاهيم العلمية هي ، غالباً وفي الأصل ، المفاهيم التي نستخدمها في لغة التخاطب العادية في شؤون الحياة ؛ ولكنها تنمو وتتطور بشكل مختلف تماماً . فهي تتحول وتتخلص من الغموض الذي يشوبها في اللغة العادية وتكتسب ، في مدلولاتها العلمية ، دقة تجعلها قابلة للاستخدام في مجال التعبير العلمي .

ويرى الفيزيائي أن من المفيد أن نقول إن سرعتي الكرتين (أو السيارتين) المتحركتين في منحيين مختلفين مختلفتان . ورغم أن هذا الأمر هو موضوع اصطلاحي بحت فمن الملائم أن نقول عن أربع سيارات تسير على طرق مختلفة أنها ذات سرعات مختلفة حتى ولو كانت إبرة السرعة في كل منها تشير إلى ستين كيلومتراً في الساعة . إن هذا الفرق بين كلمتي حركة وسرعة يُبرز كيف تنطلق الفيزياء من مفهوم مستخدم في اللغة اليومية فتعدل مدلوله بحيث يصبح خصب الفائدة في التطور اللاحق للعلم .

عندما نقيس طولاً نعبر عن نتيجة القياس بعدد من الوحدات ، فطول قضيب يمكن أن يكون مترين ونصفاً ، ووزن جسم يمكن أن يكون ١٥٠٠ غرام ، وفترة زمنية يمكن أن تساوي عدداً من الدقائق أو عدداً من الثواني . وفي كل من هذه الحالات نعبر عن النتيجة بعدد . لكن العدد

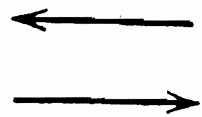
وحده لايكفي للتعبير عن بعض المفاهيم الفيزيائية ؛ وإن الاعتراف بهذ الواقع يشكل تقدماً محسوساً في التحري العلمي . فالمنحى لايقل أهمية ، لدى تحديد السرعة مثلاً ، عن العدد ، والكمية التي تتمتع بمقدار كما تتمتع بمنحى تسمى **شعاعاً** ؛ والرمز الملائم لتمثيل الشعاع هو السهم . فالسرعة يمكن أن تتمثل بسهم أو ، بتعبير أدق ، بشعاع طوله يساوي قياس السرعة معبراً عنه بعدد من الوحدات من عيار يختار سلفاً ، ومنحاه منحى الحركة .

إذا انطلقت أربع سيارات من مكان واحد في أربعة مناحي مختلفة بسرعات متساوية في المقدار ، فإن سرعاتها يمكن أن تتمثل بأربعة أشعة متساوية في الطول ، كما نفعل في الشكل ١ حيث يتلخص سلّم المخطط بأن كل ١ سم من طول الشعاع يمثل ٢٠ كيلومتراً في الساعة . وبهذه الوسيلة يمكن أن نمثل أية سرعة بشعاع ؛ وكل خط شعاعي من هذا القبيل يسمح بمعرفة السرعة إذا علمنا سلّم المخطط .



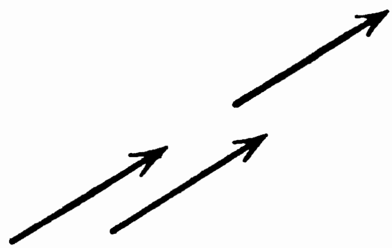
شكل (١)

وإذا تحاذت سيارتان في اتجاهين متعاكسين على طريق واحد وكانت إبرة السرعة في كل منهما تشير إلى ٦٠ كيلومتراً في الساعة فإننا نمثل سرعتيهما ، كما في الشكل ٢ ، بشعاعين متوازيين(ونقول متفقين في المنحى) ، متساويين في الطول ومتعاكسين في الاتجاه وبهذه الصورة نمثل الاتجاهين المتعاكسين للقطارات ، نحو الشمال أو نحو الجنوب ، بشعاعين متعاكسين . لكن القطارات التي تمر ، بسرعة معينة ، أمام محطات متوالية أو على سكك متوازية وفي اتجاه واحد (أي



شكل (٢)

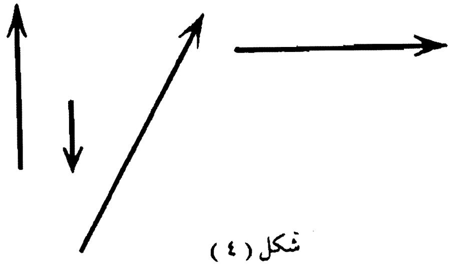
أنها متفقـة في قيمـة السرعة ومنحاها وجهتها) ، تمثل ، في اصطلاحنا ، حركة واحدة ؛ فتتمثل عندئذٍ بشعاع واحد (بأحد الأشعة الثلاثة في الشكل ٣) .



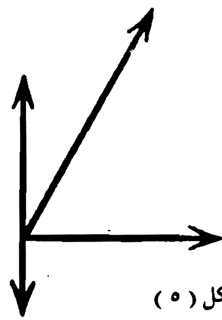
شكل (٣)

وهذا الشعاع لايدل على المحطات التي يمر بها القطار ولاعلى أي السكتين المتوازيتين يدرج . وبتعبير آخر نقول : إن الأشعة الثلاثة المرسومة في الشكل ٣ يمكن أن تعتبر ، بموجب الاصطلاح المعتمد ، متسـاوية ؛ فهي تقع على مستقيم واحد أو على مستقيمات متوازية ، ولها طول واحد ، وتتجه سهامها في اتجاه واحد . أما الشكل ٤ فيمثل أشعة مختلفة فيما بينها لأن كلاً منها يختلف عن الآخرين إما بالطول وإما بالمنحى أو بكليهما معاً ، كما أن هذه الأشعة الأربعة يمكن أن تُرسم بصورة أخرى لها فيها نقطة انطلاق واحدة (شكل ٥) . ولما كانت نقطة الانطلاق غير ذات أهمية فإن أياً من الشكـلين ، ٤ أو ٥ ، يمكن أن يمثل سرعات أربع سيارات تنطلق من مكان واحد أو أربع سيارات تنطلق من أمكنة مختلفة في البلد وتتحرك بالسرعات والاتجاهات المرسومة .

يمكن الآن أن نستخدم هذا التخطيط الشعاعي لتمثيل الوقائع التي تخص الحركة المستقيمة



شكل (٤)

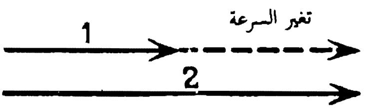


شكل (٥)

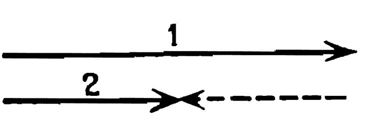
التي درسناها . لقد تكلمنا عن سيارة تدرج بانتظام في خط مستقيم وتتلقى صدمة في اتجاه حركتها تزيد في سرعتها . يمكن أن نمثل تخطيطياً هذه الواقعة بشعاعين ، أحدهما أقصر من الآخر ويمثل السرعة قبل الصدم والآخر أطول بقليل وباتجاه السرعة الأولى ويمثل السرعة بعد الصدم ، (شكل ٦) . ومعنى الشعاع المنقط واضح ، فهو يمثل تغير السرعة الذي تولده الصدمة . أما عندما نوجه قوة الصدم بعكس اتجاه الحركة ، مما يؤدي إلى تباطئها ، فإن المخطط يختلف قليلاً ، ونرى من جديد أن الشعاع المنقط (شكل ٧) يمثل تغير السرعة ولكنه ذو اتجاه مختلف هنا . ونرى في هذا المثال أن تغيرات السرعة تتمثل ، هي أيضاً ، بأشعة وليس السرعات فقط ؛ ولما كان كل تغير في السرعة

يتطلب تأثير قوة فلابد من تمثيل القوة أيضاً بشعاع . فلتعيين القوة لايكفي إذن أن نذكر فقط الشدة التي ندفع بها السيارة ؛ فالقوة ، كالسرعة وتغيرها ، لابد من تمثيلها بشعاع وليس بعدد فقط ؛ وعلى هذا فإن القوة الخارجية تتمثل هي أيضاً بشعاع يتجه باتجاه تغير السرعة ؛ وفي الشكلين ٦ و ٧ يشير الشعاعان المنقطان إلى جهة القوة كما يشيران تماماً إلى تغير السرعة .

وهنا يمكن للإنسان المتشكك أن يقول إنه لايرى أية فائدة من اختراع الأشعة ، وأن كل ما فعلناه لايتعدى ترجمة الوقائع المعروفة سلفاً إلى لغة قليلة الشيوع ومعقدة . الواقع أنه يصعب علينا في هذه المرحلة أن نقنعه بخطأ وجهة نظره ، لأنها صائبة في الوقت الحاضر ، لكننا سنرى أن هذه اللغة الغريبة تقود إلى تعميم هام تلعب فيه الأشعة دوراً جوهرياً .



شكل (٦)



شكل (٧)

لغـز الحـركـة

طالما بقي اهتمامنا مقصوراً على الحركة المستقيمة فسنبقى بعيدين عن تفهم الحركات التي نراها في الطبيعة . وعلينا أن نهتم بالحركات على خطوط منحنية . وتكون مهمتنا التالية أن نكتشف القوانين التي تحكم هذه الحركات ؟ وليس هذا بالأمر السهل . هذا وإن مفاهيم السرعة وتغير السرعة والقوة قد ظهرت عظيمة الفائدة في الحركة المستقيمة . ولكننا لانرى فوراً كيف يمكن أن نطبقها

على الحركة وفق خط منحن . والواقع أن من الممكن أن نتصور أن هذه المفاهيم القديمة لاتصلح لتوصيف الحركة العامة وأنه لابد من اختراع مفاهيم جديدة . فهل يجب أن نحاول اتباع طريقنا السالف أم يجب أن نجد طريقاً آخر ؟

إن تعميم مفهوم من المفاهيم عملية جد شائعة في العلم . والتعميم لايفرض علينا عملية معينة بحد ذاتها لأنه يمكن عادة أن يتم بعدة أساليب . لكن هناك شرطاً واحداً لابد من احترامه مهما كان أسلوب التعميم المختار ، وهو : إن كل مفهوم معمم يجب أن يعود إلى المفهوم الأولي عندما تعود وتتحقق الظروف الأولية .

ويمكن أن نشرح هذا الكلام بواسطة المثال الذي نسوقه فيما يلي : يمكن أن نحاول تعميم المفاهيم القديمة ، للسرعة ولتغير السرعة والقوة ، على حالة حركة تحدث على خط منحن . فنحن ، عندما نتكلم عموماً عن المنحنيات ، نعدُّ الخطوط المستقيمة من جملتها . فالخط المستقيم هو حالة خاصة من المنحنيات الشائعة . وعلى هذا الأساس فإن مفاهيم السرعة وتغير السرعة والقوة ، التي ندخلها في الحركة على خط منحن ، تدخل من تلقاء نفسها في الحركة على خط مستقيم . لكن هذه النتيجة يجب أن لاتتعارض مع النتائج الأخرى التي حصلنا عليها آنفاً . فإذا أصبح المنحني خطاً مستقيماً فإن كل هذه المفاهيم يجب أن تعود إلى المفاهيم المألوفة التي تخص الحركة المستقيمة . لكن هذا الشرط لايكفي لتحديد طريقة ذات اتجاه واحد نحو التعميم ؛ بل هو يبقي الباب مفتوحاً نحو عدة إمكانيات . ويبرهن تاريخ العلم على أن التعميمات الأكثر بساطة كانت خصبة أحياناً وعقيمة أحياناً أخرى . وعلينا في بادىء الأمر أن نخمن الطريق ؛ ومن السهل في حالتنا هذه أن نخمن طريقة التعميم الصحيحة . وقد ثبت أن المفاهيم الجديدة كانت خصبة جداً ومفيدة في فهم حركة الحجر المقذوف وحركة الكواكب حول الشمس على حد سواء .

والآن ما هي بالضبط مدلولات كلمات السرعة وتغير السرعة والقوة في الحالة العامة لحركة على خط منحن ؟ لنبدأ بالسرعة . ولنتأمل في جسم صغير جداً يتحرك على منحن من اليسار إلى اليمين . ونسميه بعد الآن **جسيماً** . إن النقطة الواقعة على المنحني في الشكل ٨ تعين مكان الجسيم في لحظة زمنية ما . فما هي سرعته في هذه اللحظة وفي هذا المكان ؟ نعود من جديد إلى خط غاليله الموجه لنهتدي به في طريقة إدخال مفهوم السرعة . علينا أن نستخدم مرة أخرى خيالنا وأن نفكر بتجربة مثالية . أمامنا جسيم يتحرك على منحن ، من اليسار إلى اليمين ، تحت تأثير قوى



شكل (٨)

خارجية(*) . لنتصور أن هذه القوى قد توقفت فجأة عن التأثير في لحظة معينة في النقطة المرسومة على الشكل ؛ لابد للحركة بعدئذٍ من أن تصبح منتظمة ، بموجب قانون العطالة . ونحن ، بالتأكيد ، لانستطيع عملياً أن نحرر الجسيم بتاتاً من كل المؤثرات الخارجية . ولكننا نستطيع أن نخمن « ما يمكن أن يحدث إذا ... » وأن نحكم على صواب تخميننا من خلال النتائج التي يمكن استنباطها منه ومن مدى انسجامها مع التجربة .

إن الشعاع في الشكل ٩ يشير إلى الجهة المخمنة للحركة المنتظمة عندما تختفي كل القوى الخارجية . إنها جهة ما نسميه عادةً المستقيم المماس للمنحني في النقطة المعتبرة . ولو رصدنا بواسطة مجهر جسيماً متحركاً فإن الجزء الصغير الذي نراه من المنحني يبدو لنا قطعة مستقيمة صغيرة ؛ والمماس هو امتداد هذه القطعة . فالشعاع المرسوم في الشكل ٩ يمثل هنا السرعة في لحظة معينة ؛ وشعاع السرعة يقع على المماس ؛ وطوله يمثل قياس السرعة الذي تشير إليه مثلاً إبرة السرعة في السيارة .



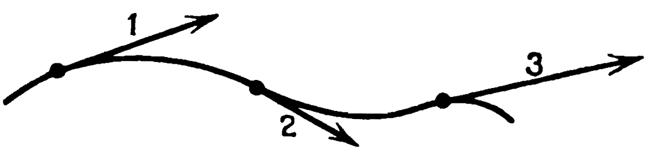
شكل (٩)

(*) لابد ، في حركة الجسيم وفق خط منحن غير مستقيم ، من وجود قوة خارجية مسلطة على الجسيم ؛ لأن حركته تكون بدونها مستقيمة منتظمة ، بموجب قانون العطالة الآنف الذكر . (حاشية المترجم) .

إن تجربتنا المثالية التي تسعى إلى تقليص الحركة في سبيل إيجاد شعاع السرعة لايجب أن تحمل على محمل الجد أكثر مما ينبغي ، فهي تعيننا فقط على فهم ما يمكن أن نسميه شعاع السرعة وتجعلنا قادرين على تعيينه في لحظة معينة وفي نقطة معينة .

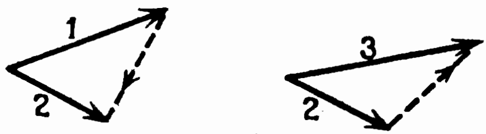
وفي الشكل ١٠ نرى أشعة السرعة في ثلاثة مواضع مختلفة لجسيم يتحرك على منحن ؛ وفي هذه الحالة ليس منحى السرعة هو المتغير الوحيد بل إن قيمتها ، المتمثلة بطول الشعاع ، تتغير أيضاً أثناء الحركة .

ولكن هل يحقق هذا المفهوم الجديد للسرعة الشرط الذي يجب أن يحققه أي تعميم ؟ أي : هل يعود إلى المفهوم المألوف إذا أصبح المنحني مستقيماً ؟ نعم وبكل تأكيد . لأن المماس للخط المستقيم منطبق على المستقيم نفسه . فشعاع السرعة يقع على خط الحركة ، كما هي الحال تماماً في السيارة المتحركة أو الكرة المتدحرجة .



شكل (١٠)

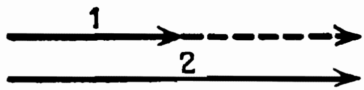
الخطوة التالية تقتضي أن نحدث تغيراً في سرعة الجسيم المتحرك على منحن . وهذا يمكن أن يحدث بوسائل عديدة ، نختار منها أبسطها وأكثرها ملاءمة . فنحن نرى ، في الشكل ١٠ ، عدة أشعة تمثل سرعة الحركة في نقاط مختلفة من مسار الجسيم . يمكن أن نرسم الشعاعين الأوليين ، ١ و ٢ بحيث يشتركان في نقطة الانطلاق ، كما في الشكل ١١ ؛ وهذا عمل مباح في عالم الأشعة كما رأينا . والشعاع المنقط ، في الشكل ١١ ، نسميه تغير السرعة وهو ينطلق من نهاية شعاع السرعة الأول وينتهي في نهاية شعاع السرعة الثاني . وهذه الطريقة في تعريف تغير السرعة قد تبدو ، لأول وهلة ، مصطنعة وعديمة المعنى . لكنها تصبح واضحة المعنى في الحالة الخاصة التي يكون فيها للشعاعين ١ و ٢ منحى واحد ، كما هي الحال في الشكل ١٢ . وهذا يعني بالفعل أننا ننتقل إلى



شكل (١١)

حالة الحركة على خط مستقيم . فإذا كان للشعاعين نقطة انطلاق واحدة فإن الشعاع المنقط يصل ، من جديد ، نهاية الأول إلى نهاية الثاني . وهذا الترسيم يتفق الآن مع الترسيم الذي سبقه ؟ ونحصل على المفهوم الأولي لتغير السرعة كحالة خاصة من هذا المفهوم العام الجديد . ونلفت النظر إلى أننا اضطررنا هنا لأن نفصل ، في الشكل ١٢ ، أحد الخطين عن الآخر بينما هما ، في الواقع الأمر ، منطبقان في الحركة المستقيمة .

بقي علينا الآن أن نخطو الخطوة الأخيرة على طريق التعميم . إنها أهم عملية تخمين نقوم بها حتى الآن . إن الصلة بين القوة وتغير السرعة قد تم إيجادها بحيث نحصل على خط موجه يتيح لنا أن نفهم المسألة العامة للحركة .



شكل (١٢)

والخط الموجه اللازم لتفسير الحركة على خط مستقيم كان بسيطاً : قوة خارجية تتسبب في تغير السرعة ، شعاع القوة يتجه باتجاه تغير السرعة . والآن ، ما هو الخط الموجه في تدبير الحركة المنحنية ؟ إنه الخط ذاته بالتمام والكمال . والفرق الوحيد هو أن تغير السرعة له هنا معنى أشمل من ذي قبل ، وإذا ألقينا نظرة على الأشعة المنقطة في الشكلين السابقين يضبح الطريق واضحاً تماماً . إذا كانت السرعة معلومة في كل نقطة من المنحني فإن اتجاه القوة في نقطة منه يمكن أن نستنتجه دون عناء . إذ يجب علينا أن نرسم شعاعي السرعة في لحظتين مفصولتين بفترة زمنية قصيرة جداً ،

مما يجعل هذين الشعاعين ينتميان إلى نقطتين متجاورتين جداً من المسار . وعندئذٍ يكون اتجاه القوة المؤثرة هو الاتجاه الذي يصل نهاية الشعاع الأول إلى نهاية الشعاع الثاني . ولكن يجب أن نؤكد على ضرورة أن يكون شعاعا السرعة مفصولين بفترة زمنية « قصيرة جداً » . هذا وإن التحليل العميق للصفتين ، « متجاورتين جداً » و « قصيرة جدا » ، ليس بالأمر اليسير . والواقع أن مثل هذا التحليل هو الذي حدا بنيوتن ولاينبتيز Leibntiz لاختراع الحساب التفاضلي .

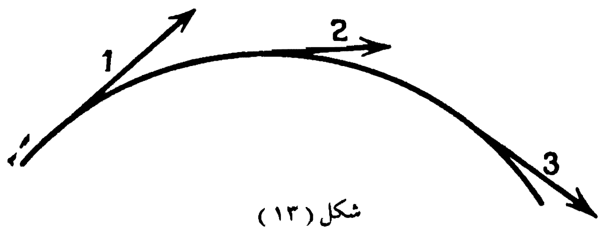
إن الطريق الذي يوصلنا إلى تعميم خط غاليله الموجه هو طريق وعر ولكنه مخطط بعناية . ولايمكننا أن نشرح هنا كيف تتجلى وفرة وخصوبة نتائج هذا التعميم . إن تطبيقه يقود إلى تفسيرات بسيطة ومقنعة لكثير من الوقائع التي كانت بدونه مفككة ومستعصية على الفهم .

إن العالم الذي نعيش فيه غني جداً بأنواع الحركات التي نصادفها فيه . لكننا سنختار أكثرها بساطة وسنطبق ، بهدف تفسيرها ، القوانين التي انتهينا من صياغتها .

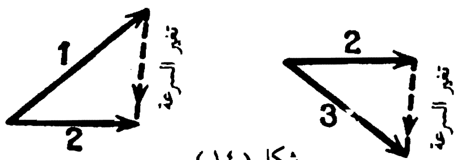
إن القذيفة الخارجة من المدفع والحجر المقذوف بشكل مائل والماء النافر من أنبوب الرش ، ترسم كلها مسارات مألوفة من نوع واحد ، أي قطعاً مكافئاً(*) . لنفترض أننا ربطنا بالحجر مقياس سرعة يتيح لنا أن نرسم ، في أية لحظة ، شعاع سرعة الحجر ؛ وأننا حصلنا بواسطته على المخطط المرسوم في الشكل ١٣ . إن اتجاه القوة المتسلطة على الحجر هو ، بالضبط ، اتجاه تغير السرعة عند كل نقطة من المسار ؛ وقد رأينا كيف يمكن أن نعين هذا التغير . والنتيجة ، كما تظهر في الشكل ١٤ ، تدل على أن القوة شاقولية ومتجهة نحو الأسفل (اتجاه الشعاع المنقط) وهذا ما يحدث أيضاً لو تركنا الحجر يسقط حراً من قمة برج : المساران مختلفان والسرعتان مختلفتان ، نعم ، لكن تغير السرعة يحدث في الاتجاه الشاقولي ذاته في كلتا الحالتين ، أي باتجاه مركز الكرة الأرضية .

إن الحجر المربوط في طرف حبل والذي نجعله يدور في مستو أفقي يرسم مساراً دائرياً ؛ وكل الأشعة المرسومة في مخطط الشكل ١٥ ، والتي تمثل سرعة هذه الحركة ، هي ذات طول واحد إذا كانت سرعة دوران الحجر ثابتة ، ولكننا ، مع ذلك ، لايمكن أن نقول إن السرعة منتظمة ؛ ذلك لأن المسار ليس خطاً مستقيماً . والحركة المنتظمة هي الحركة الوحيدة التي لاتتضمن أية قوة . أما في الحركة الدائرية فيوجد قوة والسرعة تتغير ، لا في قيمتها بل في منحاها . ولكن ، وبموجب قانون

(*) هو خط منحن يتمتع بميزة أن كل نقطة منه متساوية البعد عن نقطة معينة (تسمى محرق القطع) وعن مستقيم معين (يسمى دليل القطع) . (المترجم) .



شكل (١٣)

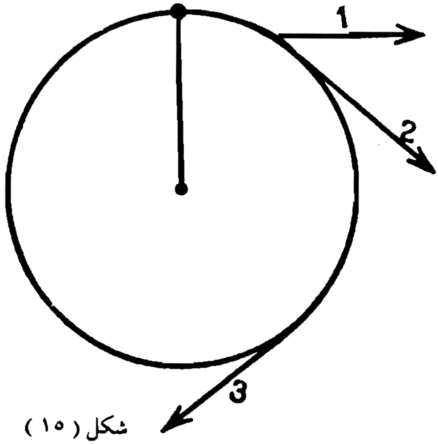


شكل (١٤)

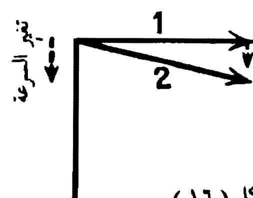
الحركة ، لابد من وجود شيء يتسبب في هذا التغير . والقوة ، في حالتنا هذه ، تؤثر بين الحجر واليد التي تمسك بالحبل . وهنا ينطرح فوراً السؤال التالي : في أي اتجاه تعمل هذه القوة ؟ ومرة أخرى نجد الجواب من خلال التخطيط الشعاعي . فنرسم شعاعي السرعة من أجل نقطتين متجاورتين جداً من دائرة المسار (شكل ١٥) ثم نرسم شعاع تغير السرعة . إن هذا الشعاع الأخير يتجه ، كما نرى ، على طول الحبل نحو مركز الدائرة (الشعاع المنقط في الشكل ١٦) وهو عمودي دوماً على شعاع السرعة ، أي على المماس ؛ وبتعبير آخر نقول : إن اليد تسلط على الحجر قوة تنتقل إليه عن طريق الحبل .

إن هذه الحركة تشبه حركة دوران القمر حول الأرض ، التي يمكن أن نمثلها بحركة دورانية منتظمة تقريباً . إن القوة فيها تتجه نحو الأرض للسبب نفسه الذي يجعل القوة المطبقة على الحجر ، في المثال السابق ، تتجه نحو اليد . لكن لايوجد هنا حبل يربط ما بين الأرض والقمر . بيد أن هذا لايمنعنا من أن نتصور خطاً مستقيماً يصل بين مركزيهما ؛ والقوة تعمل على طول هذا الخط وتتجه نحو الأرض ، تماماً كالقوة التي تتسلط على حجر نقذفه في الهواء أو نتركه يسقط حراً من أعلى البرج .

يمكن أن أوجز كل ما قلناه بخصوص الحركة بالنص التالي : **إن القوة وتغير السرعة شعاعان لهما اتجاه واحد .** هذا هو الخط الموجه الأول في مسألة الحركة ؛ لكنه ليس ، بالتأكيد ، كافياً



شكل (١٥)



شكل (١٦)

لإعطاء تفسير كامل لكل الحركات التي يمكن أن نصادفها . إن الانتقال من طريقة أرسطو في التفكير إلى طريقة غاليله هو حجر الزاوية الأعظم أهمية في أساس العلم . ومنذ أن حدثت هذه القفزة أصبح طريق التطور اللاحق للعلم واضحاً . ونحن نهتم هنا بالأطوار المبكرة لهذا التطور وذلك باتباع الدروب الأولى وبعرض الكيفية التي نشأت فيها مفاهيم الفيزياء الجديدة أثناء الكفاح القاسي ضد المعتقدات العتيقة . وسنركز انتباهنا فقط على أعمال رواد العلم الذين أوجدوا دروب تطور جديدة وغير منتظرة وعلى مغامرات الفكر العلمي الذي يرسم للعالم صورة تتغير باستمرار . وللخطوات الحاسمة ، دوماً ، صفة ثورية . والتطور العلمي يُري المفاهيم القديمة ضيقة الأفق ويستبدل بها مفاهيم جديدة . هذا وإن التقدم المستمر في الدرب المرسوم يحتفظ بصفة التطورية

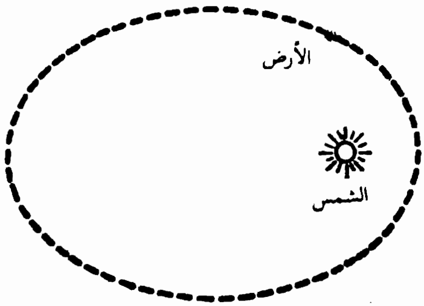
حتى يصـل إلى منعطف يرى بعده حقلاً جديداً يجب استكشـافه . ونحن لكي نفهم مع ذلك الأسباب والمصاعب التي تدفعنا لأن ندخل تغييراً في مفاهيم هامة ، يجب علينا أن لانكتفي بمعرفة الأدلة البدئية بل أن نعرف أيضاً النتائج التي يمكن أن تترتب على هذا التغيير .

إن ما يدهش أكثر من سواه من خصائص الفيزياء الحديثة هو أن نتائجها المستخلصة من الأدلة الأولى ليست كيفية فحسب بل وكمية أيضاً . لنعد من جديد إلى حالة الحجر الذي نتركه يسقط من قمة البرج : فلقد رأينا أن سرعته تتزايد أثناء سقوطه ؛ لكننا نود أن نعرف أشياء أخرى . ما هو مقدار هذا التغير في السرعة ؟ أين يوجد الحجر بعد فترة ما من بدء سقوطه وكم هي سرعته آنئذ ؟ أي أننا نود لو نستطيع أن نتنبأ بالحوادث وأن نتمكن ، بالتجربة ، من التحقق من صحة هذه التنبؤات ، وبالتالي من افتراضاتنا الأولية .

إننا لكي نحصل على نتائج كمية نجد أنفسنا مضطرين إلى استخدام لغة الرياضيات ، وإن غالبية أفكار العالم الأساسية هي في جوهرها بسيطة ويمكن أن نعبر عنها عموماً بلغة يفهمها كل الناس . لكن اقتفاء هذه الأفكار عن كثب يستلزم أن نملك تقنية دقيقة في التحريات . والرياضيات وسيلة ضرورية من وسـائل المحاكمة عندما نريد أن نتوصل إلى نتائج يمكن أن نضعها على محك التجربة . ونحن ، طالما ينحصر اهتمامنا في الأفكار الأساسية للفيزياء ، يمكننا أن نستغني عن لغة الرياضيات . وبما أننا ، في هذا الكتاب ، نلتزم بهذا الخط التزام الحريص فسنضطر ، عندما تدعو الحاجة ، إلى أن نذكر ، دون برهان ، بعض النتائج الضرورية ، كي نفهم النظريات الهامة التي ستصادفنا على الطريق . وإن الثمن الذي لابد أن ندفعه لهجر لغة الرياضيات هو فقدان الدقة والاضطرار إلى أن نذكر أحياناً نتائج لم نبرهن على كيفية الحصول عليها .

يوجد نموذج للحركة هام جداً ، هو حركة الأرض حول الشمس . ونحن نعلم أن مسار الأرض منحن مغلق معروف يسمى اهليلجاً أو قطعاً ناقصـاً ، وإن رسم المخطط الشعاعي لتغير السرعة يدل على أن القوة المتسلطة على الأرض تتجه نحو الشمس . لكن كل هذا ليس ، فيما يهمنا ، سوى معلومات هزيلة . فنحن نود أن نكون قادرين على التنبؤ بمكان الأرض والكواكب الأخرى في أي وقت نريد ، على أن نتنبأ بموعد الكسوف القادم ومدته ، وبأحداث فلكية أخرى عديدة . إن كل ذلك ممكن ، ولكن ليس بالاعتماد على خطنا الموجه الأول ، لأن من الضروري في سبيل ذلك أن نعرف ، بالإضافة إلى جهة القوة ، مقدارها ، أي شدتها ، ولقد كان نيوتن أول من أصدر تخميناً ناجحاً في هذا الصدد . فبموجب **قانون التثاقل** الذي تكهن به قال بأن قوة التجاذب بين جسمين

ترتبط ، بعلاقة بسيطة ، بالمسافة بينهما ؛ وهي تصغر عندما تزداد هذه المسافة ، وبعبارة أدق ، تصبح القوة أصغر بـ ٢×٢=٤ مرات عندما تصبح المسافة أكبر بمرتين ، وتصبح أصغر بـ ٣×٣=٩ مرات عندما تصبح المسافة أكبر بـ ٣ مرات .



شكل (١٧)

وهكذا نرى ، في حالة قوة التثاقل ، أننا نجحنا في أن نعبر بأسلوب بسيط عن علاقة القوة بالمسافة التي تفصل بين جسمين متحركين . ونحن نتصرف بأسلوب يشبه هذا الأسلوب في الحالات الأخرى التي تتجلى فيها قوى من أصل آخر ، كهربائية أو مغنطيسية مثلاً أو ما أشبه ذلك ؛ أي أننا نجهد في استخدام صيغة بسيطة للقوة ، والمسوغ الوحيد لهذه الصيغة هو أن تتطابق النتائج التي نستخلصها منها مع النتائج التجريبية .

لكن معرفة قوة التثاقل وحدها لاتكفي لفهم حركة الكواكب . ولقد رأينا أن الشعاعين اللذين يمثلان القوة وتغير السرعة خلال فترة زمنية قصيرة لهما اتجاه واحد ؛ لكن علينا أن نسير مع نيوتن خطوة أخرى وأن نفترض علاقة بسيطة بين طوليهما . إن هذه العلاقة تتلخص بما يلي : إن تغير السرعة يتناسب مع القوة عندما تتساوى الظروف الأخرى ، أي عندما يكتسب الجسم المتحرك الواحد تغيرات في السرعة متساوية في فترات زمنية متساوية .

فنحن نحتاج إذن إلى تخمينين كاملين كي نستخلص نتائج كمية عن حركة الكواكب . أحدهما عام ويتناول العلاقة بين القوة وتغير السرعة ، والآخر خاص ويعطي علاقة دقيقة بين قوة من نوع معين والمسافة بين جسمين . أولهما قانون نيوتن العام في الحركة ، والآخر قانونه في التثاقل : وهما يتعاونان معاً في تعيين الحركة . وهذا ما يمكن أن يتضح من خلال محاكمة أخرى تبدو مبسطة

بعض الشيء : لنفترض أن بالإمكان أن نعين ، في وقت معين ، مكان الكوكب وسرعته وأن القوة معروفه ؛ نستطيع عندئذٍ ، بموجب قانون نيوتن ، أن نعرف تغير السرعة . نستطيع أن نعين سرعة الكوكب ومكانه في نهاية الفترة الزمنية المعتبرة . وبتكرار هذه العملية على فترات زمنية قصيرة متوالية نستطيع أن نرسم كل مسار الكوكب المتحرك دون اللجوء إلى عمليات رصد متوالية . إنها الطريقة المبدئية التي بواسطتها يتنبأ علم الميكانيك بمسار الجسم المتحرك ، ولكنها ليست طريقة عملية .

إن هذه الطريقة في السير ، خطوة خطوة ، هي عملياً طريقة متعبة جداً وقليلة الدقة ؛ وبإمكاننا ، لحسن الحظ ، أن نستغني عنها . وبهذا الصدد يقدم لنا علم الرياضيات طريقاً أقصر ويتيح لنا توصيف الحركة بكمية من الحبر أقل مما يلزم لكتابة جملة واحدة . والتجربة هي المحك النهائي للنتائج التي نتوصل إليها .

إن هذا النوع من القوة الخارجية ، أي قوة التثاقل ، هي التي تتدخل في سقوط الحجر وفي حركة القمر على مداره ؛ إنها قوة الجذب التي تسلطها الأرض على الأجسام المادية . وقد شعر نيوتن بأن حركات الأحجار الساقطة وحركات القمر والكواكب ليست سوى مظاهر خاصة لقوة واحدة ، هي قوة التثاقل الكونية التي تؤثر فيما بين جسمين ماديين أياً كانا . ويمكن توصيف الحركة والتنبؤ بمستقبلها ، في الحالات البسيطة ، بواسطة الرياضيات . أما في الحالات المعقدة التي تتضمن عدة أجسام متفاعلة فيما بينها فيكون التوصيف الرياضي لحركاتها أكثر صعوبة ؛ لكن المبادئ الأساسية هي هي في كل الأحوال .

فالنتائج التي توصلنا إليها ، أثناء اتباع الخطوط الموجهة الأولى ، تبقى محققة في حركة الحجر المقذوف وفي حركات القمر والأرض والكواكب .

ومن الضروري أن توضع مجموعة تخميناتنا برمتها على محك التجربة ، فتؤيدها أو تنقضها . لكن أياً من هذه الافتراضات لايمكن أن يُفصل لوحده كي يُدرس بمعزل عن الباقين . وفي حركة الكواكب حول الشمس اتضح أن منظومة قوانين الميكانيك فعالة بشكل مدهش . على أننا يمكن ، مع ذلك ، أن نتصور منظومة أخرى من القوانين ، مستندة إلى افتراضات مختلفة ، تكون على درجة من الفعالية لاتقل عن تلك .

والمفاهيم الفيزيائية مخلوقات اختيارية ينجبها الفكر البشري ؛ أي أنها ليست أشياء يفرضها

حصراً علينا العالم الخارجي . وحالنا في المجهود الذي نبذله كحال من يحاول أن يفهم آلية عمل ميقاتية مغلقة ؛ فهو يرى لوحة أرقامها ويشاهد حركة عقاربها ويسمع صوت نبضها ؛ بيد أنه لايملك وسائل فتح غلافها . لكن الرجل الذكي يستطيع أن يتصور لهذه الآلية تركيباً يجعله السبب في كل ما يرى ، لكنه لن يكون أبداً على يقين من أن هذا التصور هو التصور الوحيد القادر على تفسير مشاهداته ؛ ولن يكون أبداً في وضع يتيح له أن يقارن تصوره بالآلية الفعلية ؛ كما أنه لايستطيع حتى أن يتخيل إمكانية هذه المقارنة أو مغزاها . غير أن الباحث يوقن بأن تكاثر المعلومات التي تتجمع لديه على طريق البحث تساعد ، شيئاً فشيئاً ، على إيضاح الصورة وعلى تفسير ظواهر تنتمي إلى مجالات أوسع فأوسع من انطباعاته الحسية . كما أنه قد يتيقن من وجود حدود للفكر البشري لايمكن أن يتخطاها . ويمكنه أن يطلق على ما يقع خارج هذه الحدود اسم الحقيقة الموضوعية .

بقي درب

عندما يأخذ المرء بدراسة الميكانيك يتشكل لديه انطباع بأن كل شيء ، في هذا الفرع من العلم ، ميسر وأساسي وأن كل القوانين التي استخلصها حقيقة لاحقيقة سواها . ولم يكن ليخطر على البال وجود درب آخر هام لم يلحظه أحد خلال ثلاثة قرون ؛ وهذا الدرب الذي لم يُطرق ينطلق من أحد المفاهيم الأساسية في علم الميكانيك ، وهو مفهوم **الكتلة** .

لنعد إلى التجربة البسيطة المثالية لسيارة موضوعة على طريق منبسط . فإذا كانت في حالة سكون ثم أعطيناها صدمة فستتحرك بعدئذٍ بسرعة معينة . لنفترض أن هذه التجربة يمكن أن نكررها عدداً كبيراً من المرات ، بآلية الصدم نفسها وبالقوة نفسها وعلى السيارة نفسها وعلى الطريق نفسه . فمن المعقول أن نقبل عندئذٍ أن سرعة السيارة بعد الصدم تكون هي نفسها أيضاً في كل مرة . ولكن ماذا يحدث لو أدخلنا تعديلاً على التجربة ، كأن نجعل السيارة محملة أكثر من ذي قبل ؟ من الواضح أن السرعة بعد الصدمة تصبح أصغر من ذي قبل ؛ فنستنتج : إذا تسلطت قوتان متساويتان على جسمين مختلفين كانا ساكنين ، فإن سرعتيهما بعد الصدم تكونان مختلفتين . ونقول : إن السرعة تتعلق بكتلة الجسم ، وتكون أصغر إذا كانت كتلته أكبر .

وهكذا نتعلم ، نظرياً على الأقل ، كيف نتمكن من تعيين كتلة الجسم ، أو بتعبير أدق ، بكم مرة تكون كتلة هذا الجسم أكبر من كتلة ذاك . فإذا كنا نمتلك قوتين متساويتين نصدم بهما

جسمين مختلفين ساكنين وتحققنا من أن سرعة الأول بعد الصدم تساوي ثلاثة أضعاف سرعة الثاني ، نستنتج أن كتلة الأول أصغر بثلاث مرات من كتلة الثاني . بيد أن هذه ليست طريقة عملية لقياس نسبة كتلتين ؛ لكن هذا لايمنعنا من أن نتصور أننا نستعملها أو نستعمل أية طريقة أخرى تشبهها وتستند على قانون العطالة .

ولكن كيف نقوم عملياً بقياس الكتلة ؟ بالتأكيد ، ليس بالطريقة التي أتينا على شرحها . أما الجواب السديد فيعرفه كل الناس : بواسطة الميزان .

لنفحص عن كثب هاتين الطريقتين المختلفتين لتعيين الكتلة .

إن تجربة الطريقة الأولى لم يكن لها أية علاقة بالثقالة ، أي بجاذبية الأرض . فالسيارة ، بعد أن تتلقى الصدمة ، تتحرك على سطح أفقي مستو أملس تماماً . فقوة الثقالة ، وهي سبب بقاء السيارة على السطح ، لاتتغير ولاتلعب أي دور في تعيين الكتلة . لكن الأمر يختلف عن ذلك كلياً في طريقة الميزان ؛ فنحن لانستفيد شيئاً من الميزان لو أن الأرض لاتجذب الأجسام . فالفرق بين طريقتي تعيين الكتلة هاتين هو أن أولاهما عديمة العلاقة بقوة الثقالة ، بينما تستند الثانية جوهرياً على وجود هذه القوة .

ولنسأل الآن : إذا قسنا بهاتين الطريقتين نسبة كتلتين فهل نحصل على قيمة واحدة لهذه النسبة ؟ إن جواب التجربة عن هذا السؤال واضح لا لبس فيه : نعم وبدقة . إن هذه النتيجة ليست وليدة المحاكمة الفكرية ، ويستحيل الحصول عليها إلا من خلال التجربة . لنطلق إذن ، توخياً لبساطة التعبير ، اسم **الكتلة العطالية** على الكتلة التي نحصل عليها من التجربة الأولى ، واسم **الكتلة الثقالية** أو الوازنة على الكتلة التي نحصل عليها بواسطة الميزان . وقد اتفق ، في العالم الذي نعيش فيه ، أن تكون هاتان الكتلتان متساويتين ؛ لكننا نستطيع أن نتصور أنه كان يمكن أن لاتكونا متساويتين . وهنا ينطرح فوراً السؤال التالي : هل التطابق بين هذين النوعين من الكتلة صدفة بحتة ، أم هل يجب علينا أن نفتش فيه عن معنى خفي ؟ إن الجواب من وجهة نظر الفيزياء التقليدية ، هو : إن هذا التطابق عرضي ولايجب أن نعلق به أي معنى عميق . لكن جواب الفيزياء الحديثة معاكس تماماً : إن التطابق بين الكتلتين ظاهرة معنوية أساسية ويجب أن تُتخذ وسيلة للتوغل إلى أكثر مستويات الطبيعة عمقاً . وهذه الفكرة تشكل ، في واقع الأمر ، أهم نقاط الانطلاق لنشوء نظرية النسبية العامة .

إن الرواية ذات الأسرار تبدو من مستوى منخفض إذا كانت الظواهر الغريبة فيها تحسب من الصدف . ونحن بالتأكيد نستحسن الرواية إذا كانت تسير وفق مخطط منطقي . وهكذا ، فإن النظرية التي تقدم تفسيراً لظاهرة تطابق الكتلة الثقالية مع الكتلة العطالية أفضل من النظرية التي ترى في هذا التطابق صدفة محضة ؛ هذا إذا كانت النظريتان تنسجمان ، سواءً بسواء ، مع الوقائع المرصودة .

بما أن هذا التطابق بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية (الوازنة) قد لعب دوراً أساسياً في بناء نظرية النسبية فلنا كل العذر في أن نتفحص هذا الأمر هنا عن كثب . فما هي التجارب التي تثبت بشكل مقنع أن الكتلتين متطابقتان ؟ إن الجواب يكمن في تجربة غاليله القديمة على كتل مختلفة تركها تسقط من قمة برج عال فتحقق من أنها تستغرق في سقوطها أزمنة متساوية ومن أن حركة الجسم الساقط مستقلة عن كتلته . ولكي نجد صلة بين هذا الواقع التجريبي البسيط والمهم جداً وبين تطابق الكتلتين لابد من إجراء محاكمة معقدة بعض الشيء .

إن الجسم الساكن يستسلم للقوة الخارجية الفاعلة فيه فيأخذ بالحركة ويبلغ سرعة ما . إن مدى سهولة خضوعه للقوة يتوقف على كتلته العطالية ، علماً بأن مقاومته للحركة تصبح كبيرة كلما كانت كتلته عظيمة . وعلى هذا الأساس يمكن أن نقول ، دون أن ندعي في هذا القول دقة عالية ، بأن الفورية التي يستجيب بها الجسم لنداء القوة الخارجية تتعلق بكتلته العطالية . فإذا صح أن الأرض تجذب أي جسم بقوة واحدة فإن الجسم الذي يمتلك أكبر كتلة عاطلة لابد أن تكون حركة سقوطه أبطأ من حركة الآخرين . لكن الواقع غير هذا : إن كل الأجسام تسقط متصاحبة في الحركة ؛ وهذا يعني أن القوى التي تجذب بها الأرض كتلاً مختلفة يجب أن تكون مختلفة فيما بينها . لكن الأرض تجذب الحجر بقوة الثقل ولاتعلم شيئاً عن كتلته العطالية ، أي أن « نداء » قوة الأرض يتعلق بالكتلة الثقالية . أما « استجابة » الحجر في حركته فتتعلق بالكتلة العطالية ؛ وبما أن حركة « الاستجابة » واحدة لدى كل الأجسام ــ كل الأجسام المتروكة معاً تتصاحب أثناء السقوط ــ فلا مناص من استنتاج أن القوة الثقالية تساوي القوة العطالية .

هذا ويوجز الفيزيائيون هذه المحاكمة بالعرض المتحذلق التالي : إن تسارع حركة الجسم في سقوطه الحر يكبر متناسباً مع كبر كتلته الثقالية ويصغر متناسباً مع كبر كتلته العطالية . وبما أن كل الأجسام تسقط بتسارع واحد فلابد أن تكون هاتان الكتلتان متساويتين .

إن في روايتنا العظيمة ذات الأسرار لاتوجد مسألة محلولة بالتمام وواضحة أبد الدهر . فبعد

قرون ثلاثة وجدنا أنفسنا مضطرين للعودة إلى نقطة البدء في مسألة الحركة ، ولمراجعة أسلوب تحرياتنا وللاهتمام بأفكار كانت قد أهملت ؛ مما أدى إلى تغيير صورة العالم التي كانت مرتسمة في أذهاننا .

هل الحرارة هيولة ؟

نبدأ هنا باتباع خط موجه جديد ينطلق من مجال الظواهر الحرارية . غير أن من المستحيل أن نقسم العلم إلى أقسام عديمة الصلات فيما بينها . وواقع الأمر أننا سنرى بعد قليل أن المفاهيم التي تدخل هنا ترتبط بالمفاهيم التي ألفناها وبتلك التي سنصادفها فيما بعد . وعلى هذا فإن بعض الأفكار التي تترعرع في أحد فروع العلم يمكن أن تخدم في تفسير ظواهر تبدو ، لأول وهلة ، ذات منشأ مختلف تماماً . ومن خلال هذا التفاعل فيما بين فروع العلم يحدث كثيراً أن تتعدل المفاهيم البدئية بحيث تؤدي إلى تفهم أحسن للظواهر ، سواء تلك التي كانت سبباً في نشوئها أو تلك التي تتسبب في تعديلها .

إن أكثر المفاهيم أهمية في توصيف الظواهر الحرارية هما **الحرارة ودرجة الحرارة** . وقد استغرق العلم من تاريخه زمناً طويلاً جداً قبل أن يتوصل إلى التمييز بين هذين المفهومين . وبعد إدراك الفرق بينهما أخذ العلم يتقدم بخطى سريعة . ورغم أنهما أصبحا اليوم مألوفين جداً فإننا سنفحصهما عن كثب كي تتضح الفروق بينهما .

إن حاسة اللمس تنبئنا ، بأسلوب معين ، أن هذا الجسم حار وذاك بارد . بيد أن معيار الحاسة معيار كيفي وقاصر عن أن يتيح توصيفاً كمياً ؛ وهو فوق هذا وذاك شديد الغموض . ويمكن أن نرى ذلك بتجربة بسيطة : نضع أمامنا ثلاثة أوعية يحوي أولها ماءً بارداً والثاني ماءً فاتراً والثالث ماءً حاراً . لنغمس يداً في الماء البارد ويداً في الماء الحار ؛ فتحس الأولى بالبرودة والثانية بالحرارة . لنغمس بعدئذ اليدين فوراً في الماء الفاتر فنشعر بإحساسين متناقضين . ولهذا السبب نفسه يرى رجل الأسكيمو ورجل المنطقة الاستوائية ، عندما يجتمعان في دمشق في فصل الربيع ، رأيين متناقضين بخصوص المناخ ؛ فيقول الأول : إنه حار ويقول الثاني إنه بارد . ونحن اليوم نحسم هذه الأمور كلها باستخدام ميزان الحرارة وهو جهاز كان غاليله أول من صنع منه نسخة ذات تركيب بسيط . وهنا أيضاً تبرز هذه التسمية المألوفة ! فاستخدام ميزان الحرارة يستند على بعض افتراضات فيزيائية معروفة نستذكرها بإيراد بضعة سطور من محاضرة كان ألقاها بلاك Black من

مئة وخمسين سنة . وهو رجل علم أسهم كثيراً في تذليل المصاعب الناشئة عن مفهومي الحرارة ودرجة الحرارة .

لقد تعلمنا من استخدام هذا الجهاز أننا إذا جمعنا ألف نوع ونوع أو أكثر من أنواع المادة ، كالمعادن والأحجار والأملاح والخشب والريش والصوف والماء وسواها من أجناس المواد التي تتمتع بحرارات مختلفة ، ووضعناها معاً في غرفة غير مدفأة ولاتدخلها الشمس فإن أسخن هذه الأجسام ستتنازل عن حرارتها للأجسام الأبرد ، خلال بضع ساعات أو بعض يوم ؛ وإذا وضعنا بعدئذ ميزان الحرارة بتماس هذه الأجسام ، واحداً بعد آخر ، فإنه سيشير إلى الدرجة نفسها عند كل جسم .

إننا نستعمل اليوم تعبير **درجات حرارة** بدلاً من كلمة **حرارات** الواردة في هذا النص .

إن الطبيب الذي يسحب ميزان الحرارة من فم المريض يمكن أن يحاكم كما يلي : « إن ميزان الحرارة يشير إلى درجة حرارته الخاصة بارتفاع عمود الزئبق فيه ، وأفترض أن ارتفاع عمود الزئبق يزداد متناسباً مع تزايد درجة الحرارة ، فأصبح ميزان الحرارة والمريض بدرجة حرارة واحدة . فأستنتج أن درجة حرارة المريض هي درجة الحرارة التي يشير إليها ميزان الحرارة » . ومن المرجح أن الطبيب يتصرف بشكل آلي ، لكنه يطبق مبادىء الفيزياء دون أن يفكر بذلك .

ولكن هل يحتوي ميزان الحرارة على كمية الحرارة نفسها التي يحويها جسم المريض ؟ كلا وبالتأكيد . إن افتراض أن الجسمين يحويان حرارة واحدة لمجرد أن درجتي حرارتهما متساويتان ، يعني ، كما يقول بلاك :

اتخاذ رأي متسرع جداً في الموضوع . وهذا الرأي يخلط بين كمية الحرارة المحتواة في الأجسام المختلفة وبين قوة الحرارة أو شدتها العامة ، بالرغم من الاختلاف التام بين هذين الشيئين اللذين نضطر دوماً للتمييز بينهما عندما نتبصر في توزع الحرارة .

ونتوصل إلى فهم هذا الفرق عندما نفكر في التجربة البسيطة التالية . إن لتر الماء الذي نسخنه على حراق غاز يستغرق فترة زمنية كي يصل من درجة حرارة الغرفة إلى درجة الغليان ، لكننا نضطر للانتظار فترة أطول لغلي عشرة لترات من الماء في الوعاء نفسه وعلى الحراق نفسه . فنعبر عن هذا الواقع بالقول إن « شيئاً » إضافياً يحتاجه الماء الآن ؛ وهذا « الشيء » هو الذي نسميه **حرارة** .

ونقع على مفهوم هام آخر ، هو **الحرارة النوعية** ، إذا طورنا هذه التجربة : لنضع كيلوغراماً من الماء في وعاء وكيلوغراماً من الزئبق في وعاء آخر ولنسخنهما على حراقين متماثلين تماماً : فنرى أن

الزئبق يسخن بأسرع مما يسخن الماء بكثير ، مما يدل على أن كمية الحرارة اللازمة لتسخين كمية معينة من الزئبق ، درجة واحدة ، هي أقل بكثير من كمية الحرارة اللازمة لتسخين كمية مساوية من الماء درجة واحدة . إن هذه الظاهرة عامة ، فأجناس المواد المختلفة (كالماء والزئبق والحديد والنحاس والخشب ،...) تحتاج إلى كميات متفاوتة من « الحرارة » كي ترتفع درجة حرارتها درجة واحدة ، شرط أن تتساوى فيما بينها بالكتلة . فنقول : إن لكل نوع من المادة **سعة حرارية** خاصة به أو **حرارة نوعية** خاصة .

وبعد أن حصلنا على مفهوم الحرارة يمكن أن ندرس طبيعتها عن كثب أقرب . لنأخذ جسمين أحدهما حار والآخر بارد أو ، بتعبير أدق ، درجة حرارة أحدهما أعلى من درجة حرارة الآخر . ولنضع أحدهما بتماس مع الآخر ونعزلهما عن كل المؤثرات الخارجية ، نعلم أنهما يصلان في نهاية الأمر إلى درجة حرارة واحدة . فكيف يتم هذا ؟ ماذا يحدث بين لحظة بدء تماسهما ولحظة وصولهما إلى درجة واحدة ؟ إن صورة « سريان » الحرارة من جسم لآخر ترتسم من تلقاء نفسها كما يسري الماء من منسوب عال إلى منسوب واطىء . إن هذه الصورة ، رغم بدائيتها ، تبدو منسجمة مع كثير من الوقائع ، بحيث يتخطط هذا التشابه كما يلي :

ماء ــ حرارة

منسوب عال ــ درجة حرارة عالية

منسوب واطىء ــ درجة حرارة منخفضة

إن هذا السريان يستمر حتى يتساوى المنسوبان ، أي درجتا الحرارة . إن هذه الرؤية الساذجة يمكن أن تصبح أكثر فائدة بواسطة اعتبارات كمية . إذا كنا إزاء كتلتين معينتين من الماء والغَوْل ، في درجتي حرارتين معينتين ، ومزجناهما معاً فإن معرفة حرارتيهما النوعيتين تتيح لنا أن نتنبأ بدرجة حرارة المزيج ؛ وبالعكس : أي أن معرفة درجة حرارة المزيج ، مع قليل من علم الجبر ، تتيح لنا أن نحسب النسبة فيما بين الحرارتين النوعيتين .

إن مفهوم الحرارة ، كما يظهر حتى الآن ، يشبه بعض المفاهيم الأخرى في الفيزياء . فالحرارة ، كما تبدو من تصورنا هذا ، هيولة تشبه الكتلة في علم الميكانيك . ويمكن لكميتها أن تتغير ، أو أن لاتتغير ، مثل كمية النقود التي نضعها في خزانة حديدية أو ننفقها . ومبلغ المال الموجود في الخزانة يبقى كما هو طالما بقيت الخزانة مقفلة . وهذا أيضاً شأن كمية الكتلة وكمية الحرارة في جسم معزول . وأية قارورة عازلة للحرارة تماماً تؤدي عمل الخزانة الحديدية . ومن جهة أخرى ، وكما

تحتفظ الجملة المادية المعزولة بقيمة كتلتها رغم ما قد يطرأ فيها من تفاعلات كيميائية ، تحتفظ الحرارة بقيمتها رغم أنها غالباً ما تمر من جسم لآخر ضمن الجملة المعزولة حرارياًعن أي مؤثر خارجي . هذا ورغم أن الحرارة قد لاتُستخدم لرفع درجة حرارة الجسم ، بل لصهر الجليد أو لتبخير الماء ، فما زال بإمكاننا أن نعتبرها هيولة وأن نستردها بتمامها إذا أرجعنا الماء إلى حالة جليد والبخار إلى حالة ماء . هذا وتدل العبارتان ، حرارة الانصهار اللاطية وحرارة الاستبخار اللاطية ، على أن هذين المفهومين مستمدان قديماً من المفهوم الهيولي للحرارة . فالحرارة اللاطية مخبوءة مؤقتاً في المادة ، كالمال المخبوء في الخزانة ، ويمكن أن نستفيد منها في أغراض عديدة إذا عرفنا آلية فتح القفل .

لكن الحرارة ليست ، بالتأكيد ، هيولة ، بالمعنى الذي تحمله كلمة كتلة . لأن الكتلة يمكن كشفها بالميزان ، فهل يمكن أن نكشف الحرارة بالميزان ؟ أي : هل تزن قطعة الحديد المسخنة للاحمرار أكثر مما تزن وهي باردة كالجليد ؟ إن التجربة تثبت عكس ذلك . وعلى هذا ، لو كانت الحرارة هيولة فهي عديمة الوزن . كان القدماء يطلقون على « الهيولة الحرارية » اسم الحرور Calorique ، وهذا أول عضو نتعرف عليه من طائفة كبيرة من الهيولات العديمة الوزن ؛ وستتاح لنا ، فيما بعد فرصة اقتفاء تاريخ هذه الطائفة ، في سموها وفي انهيارها . ولكننا نكتفي الآن بالإشارة إلى ولادة هذا العضو الغريب .

إن هدف أية نظرية فيزيائية هو أن تفسر أكبر عدد ممكن من الظواهر . وهي تتبرر بمقدار ما تجعل هذه الظواهر مفهومة . وقد رأينا أن نظرية « الهيولة الحرارية » تفسر كثيراً من الظواهر الحرارية . لكننا سنرى بعد قليل أن هذه النظرية درب خاطىء . أي أن الحرارة لايمكن أن تكون هيولة لو قبلنا أنها بدون وزن ، ويتضح هذا عندما نتفكر في بعض التجارب البسيطة التي كانت نقطة البداية في نشوء الحضارة .

نحن نفهم الهيولة شيئاً لايمكن أن يتخلق ولاأن يفنى . لكن الإنسان البدائي خلق بالاحتكاك حرارة كافية لإشعال الخشب . والواقع أن حوادث التسخين بالاحتكاك أكثر وأشهر من أن تحصى أو تذكر . وفي كل هذه الحوادث تتخلق كمية من الحرارة ، وهذا واقع صعب التفسير بواسطة نظرية « الهيولة الحرارية » . صحيح أن من يريد أن يدافع عن هذه النظرية يمكن أن يجد حججاً لتفسير هذا الواقع ، وسيقول تقريباً ما يلي : « إن نظرية الهيولة الحرارية يمكن أن تفسر تخلق الحرارة الظاهر . لنأخذ مثال قطعتي الخشب المتحاكتين ؛ إن الاحتكاك يؤثر على الخشب فيغير خواصه ؛

ومن المحتمل جداً أن تتغير خواصه بحيث تنشأ كمية معينة من الحرارة تولّد درجة حرارة أعلى من ذي قبـل . ومن الممكن أن يغـير الاحتكاك الحرارة النوعية للخشب دون أن يغير كمية الحرارة الكلية » .

قد لايكون من المجدي ، في هذه المرحلة من المناقشــة ، أن نجادل أنصـار نظرية الهيولة الحرارية . لأن هذا الموضـوع لايمكن أن يتضح إلا من خلال التجربة . لنتصـور قطعتي خشب متماثلتين تماماً ولنفترض أن تغيرات في درجة الحرارة تتولد بطرائق عديدة : بالاحتكاك تارة وبالتماس مع منبع حراري تارة أخرى ؛ فإذا كان للقطعتين حرارة نوعية واحدة في درجة الحرارة الجديدة فإن نظرية الهيولة الحرارية تنهار دفعة واحدة . والواقع أنه يوجد طرائق بسيطة لقياس الحرارات النوعية . ومصير نظرية الهيولة الحرارية يتعلق حصراً بنتيجة هذه القياسات . إن الإثباتات القادرة على تقرير مصير نظرية ما ، حياة أو موتاً ، تملأ صفحات منَ تاريخ الفيزياء وهي تسمى **التجارب الحاسمة** . وأهمية الجواب الذي تعطيه التجربة الحاسمة تتوقف حصراً على الأسلوب الذي نصوغ فيه السؤال ، ولايمكن أن نضع على محك التجربة الحاسمة سوى نظرية واحدة . هذا وإن تعيين الحرارتين النوعيتين لجسمين من جنسين مختلفين في درجة حرارة واحدة ، حصلنا عليهما بالاحتكاك وبسريان الحرارة ، هو نموذج نوعي للتجـربـة الحاسمة . وقد أجريت هذه التجربة منذ ١٧٥ سنـةً في مخابر رمفورد Rumford وكانت نتيجتها ضربة قاتلة لنظرية الهيولة الحرارية ، ونقتطف من عرضه لهذه التجربة النص التالي :

كثيراً ما يحدث في الشؤون العادية وفي مشاغل الحياة أن تتاح ، من تلقاء نفسها ، مناسبات للتفكير في أكثر ظواهر الطبيعة غرابة . وفي غالب الأحيان يمكن أن تقام ، دون عناء وبواسطة آلات مخترعة ، تجارب فيزيائية جد هامة تهدف إلى تلبية حاجات الصناعة .

وقد سنحت لي فرص عديدة للقيام بذلك . وإنني على يقين من أن التعود على ملاحظة ما يحدث في الحياة العادية قد أدى غالباً ، عن طريق الصدفة أو من خلال شرود الخيال المحفوز بأكثر الظواهر شيوعاً ، إلى شكوك مفيدة وإلى مشاريع معقولة للتحري والتحسين ...

ولما كان قد أوكل إلي أن أراقب عملية ثقب أنابيب المدافع في معامل السلاح في ميونيخ ، فقد ذهلت للدرجة الهائلة التي تبلغها الحرارة في فترة زمنية قصيرة في المدفع الذي نثقبه ، وللحرارة الأشد من ذلك (أشد من حرارة الماء الغالي ، كما ثبتَ لي بالتجربة) التي تملكها كشاطات المعدن التي يكشطها المثقب ...

من أين تأتي الحرارة التي تظهر في هذه العملية الميكانيكية ؟ هل تفرزها الكشاطات التي يفصلها المثقب عن كتلة المعدن الصلبة !

لو كان الأمر كذلك فإن السعة ، بموجب المذاهب الحديثة في الحرارة اللاطية وفي الحرور ، يجب أن تتغير ، وليس أن تتغير فحسب بل وأن يكون التغير الذي تعانيه كبيراً لدرجة تكفي لتفسير كل الحرارة الناتجة ؛ لأننا لو أخذنا وزنين متساويين ، أحدهما من الكشاطات والآخر من صفائح رقيقة تقتطع بالمنشار الحاد من كتلة النحاس نفسها ، ووضعناهما وهما في درجة حرارة واحدة (درجة الماء الغالي) في كميتين متساويتين من الماء البارد (بدرجة حرارة تساوي ٥٩,٥ فارنهايت) ، فإننا نلاحظ أن الماء الذي ألقيت فيه الكشاطات لم يصبح أكثر ولا أقل سخونة من الماء الذي ألقيت فيه الصفائح .

ويخلص في نهاية العرض إلى النتيجة التالية :

وعندما نفكر في هذا الأمر يجب أن لاننسى أن نأخذ بعين الاعتبار هذه الظاهرة الهامة التي تتجلى في أن منبع الحرارة الناتجة عن الاحتكاك ، في هذه التجارب ، لاينضب معينه .

ويكاد يكون من غير الضروري أن نضيف ما يلي : إن الشيء الذي يعطيه أي جسم معزول ، أو أية مجموعة أجسام ، دون حدود لايمكن أن يكون هيولة مادية . وباستثناء الحركة ، يبدو لي من الصعب جداً ، إن لم أقل من المستحيل ، أن نشكل فكرة واضحة عن شيء قادر على أن يتهيج وعلى أن ينتقل بالطريقة التي تتهيج بها الحرارة وتنتقل في هذه التجارب .

وهكذا نرى أن النظرية القديمة تنهار ، أو بتعبير أدق ، أن نظرية الهيولة الحرارية تقتصر على مسائل سريان الحرارة ؛ وكذلك نرى ، كما توحي أقوال رمفورد ، أن علينا أن نفتش من جديد عن درب آخر . ومن أجل ذلك نترك مؤقتاً مسألة الحرارة ونعود إلى الميكانيك .

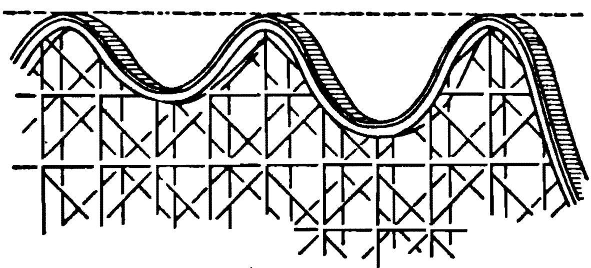
الجبال الروسية

لنتأمل في تلك الأهلية الشعبية التي تولد القشعريرة والتي تسمى الجبال الروسية(*) . عربة صغيرة ترفع لتوضع في أعلى ذروة من السكة . عندما تترك العربة وشأنها تأخذ بالانزلاق نحو الأسفل بفعل الثقالة ثم تصعد إلى الذروة التالية وتهبط من جديد على طول سكة شديدة الانحدار وتولد قشعريرة في نفوس ركابها بسبب التغيرات الفجائية في سرعتها . إن العربات في الجبال الروسية تنطلق من أعلى قمة فيها ، ثم تمر على قمم أخرى كلها أقل علواً من قمة انطلاقها . أي أن العربة في كامل شوطها لاتبلغ علو قمة انطلاقها . إن التوصيف الكامل لحركة العربة أمر معقد جداً فهناك

(*) هي ، في مدينة الملاهي ، جدار طويل متفاوت الارتفاع ومبني من قضبان حديدية ويحمل سكة حديدية يتفاوت علوها ، صعوداً وهبوطاً ، كما يتفاوت ارتفاع الجدار (انظر الشكل ١٩) وتدرج عليها عربة يركبها الأولاد . وهي غير معروفة في بلادنا . (المترجم) .

المسألة الميكانيكية من جهة ، وهناك ، من جهة أخرى ، الاحتكاك الذي يتسبب في انتشار حرارة على السكة وفي عجلات العربة . والسبب الوحيد المعقول في تقسيم هذه العملية الفيزيائية إلى هذين المظهرين هي إتاحة استعمال المفاهيم السابقة التي ناقشناها . فهذا التقسيم يجعل التجربة مثالية ، لأنه لايوجد في الفيزياء عملية ميكانيكية لايصاحبها انتشار حرارة ؛ فإذا ضربنا صفحاً عن الجانب الحراري نجعل من التجربة الميكانيكية تجربة مثالية تخيلية .

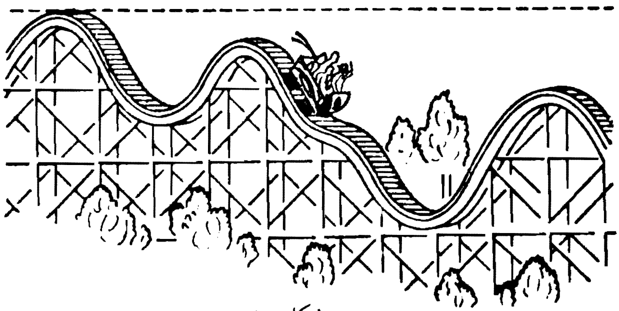
وهكذا نستطيع أن نتصور ، في التجربة المثالية ، أن مهندساً توفق في حذف كل الاحتكاكات التي تصاحب الحركة . ثم اتخذ عندئذٍ قراراً باستغلال ذلك في بناء جبال روسية وصمم على أن يفعل ذلك بنفسه . فالعربة التي ترفع لتوضع على قمة انطلاقها ، ولتكن على علو ثلاثين متراً عن سطح الأرض ، تتحرك لتنزل وتصعد . وبعد عدة تجارب يجد أنه يستطيع أن يتبع



(شكل ١٨)

القاعدة البسيطة التالية : إن له الحرية في أن يمد السكة بالشكل الذي يهوى بشرط واحد هو أن لايبني أية قمة تزيد علواً على قمة الانطلاق . فإذا تركت العربة وشأنها من قمة الانطلاق كي تبلغ نقطة النهاية فإنها ، مهما انخفضت السكة بها تستطيع أن تتسلق ، من تلقاء نفسها وعلى التوالي ، كل القمم التي لايزيد علوها عن ثلاثين متراً وأنها قاصرة حتماً عن بلوغ أية قمة أعلى من ذلك . والواقع أنها لاتبلغ حتى هذا العلو البدئي على سكة حقيقية بسبب الاحتكاك . لكن مهندسنا الافتراضي لايهتم به .

لنتبع حركة العربة المثالية على السكة المثالية بدءاً من لحظة انطلاقها نزولاً . إنها ، أثناء هبوطها ، يتناقص ارتفاعها عن الأرض . لكن سرعتها تتزايد . إن هذه الجملة يمكن أن تذكرنا لأول



شكل (١٩)

وهلة بتمرين في الترجمة « ليس لدي قلم ، لكن لديك ست برتقالات » ، لكنها ليست مع ذلك على هذه الدرجة من السخف . فلئن لم يكن يوجد أية صلة بين عدم وجود قلم عندي وبين وجود ست برتقالات عندك فإنه يوجد صلة حقيقية جداً بين ارتفاع العربة عن الأرض وبين سرعتها . ويمكننا حساب السرعة في أية لحظة إذا علمنا ارتفاع السيارة عن الأرض آنئذٍ ، لكننا لن نورد هنا هذا الحساب ، لأننا نتحاشى العمليات الرياضية رغم أنها قادرة على التعبير عن هذه الصلة بشكل أفضل .

إن سرعة العربة في أعلى قمة تكون معدومة ، وتكون العربة على علو ثلاثين متراً . وعندما تصل إلى أخفض نقطة من السكة لايعود يفصلها أية مسافة عن الأرض ، لكن سرعتها تبلغ عندئذٍ أعظم قيمة . ويمكن أن نعبر عن هذا الواقع بقول آخر : إن العربة تملك في النقطة الأعلى **طاقة كامنة ولاتملك أية طاقة حركية** ؛ لكنها ، في النقطة الأخفض ، تملك أكبر طاقة حركية وتفقد كل طاقتها الكامنة . أما في النقاط الواقعة بين القمة والحضيض ، حيث يكون للعربة سرعة ما وعلو ما ، فإنها تملك طاقة حركية وطاقة كامنة معاً . إن الطاقة الكامنة تزداد بازدياد الارتفاع بينما تزداد الطاقة الحركية بازدياد السرعة . هذا وإن قوانين الميكانيك كافية لتفسير هذه الحركة . وفي التوصيف الرياضي ينشأ نوعان من الطاقة ، كل منهما متغير أثناء هذه الحركة لكن مجموعهما لايتغير أثناءها . وعلى هذا يمكن ، رياضياً وبكل دقة ، أن نخترع مفهوم الطاقة الكامنة ، وهي تتعلق بالموضع ، ومفهوم الطاقة الحركية وهي تتعلق بالسرعة . والواقع أن إدخال هذين المفهومين عملية اختيارية لامبرر لها سوى سهولة التعبير . هذا ولما كان مجموع هاتين الطاقتين ثابتاً أثناء الحركة فإننا نسميه ثابت الحركة ، أو الطاقة الميكانيكية الكلية . ويمكن تشبيه الطاقة الكلية بهيولة أو بمقدار من المال

مبــلغـه ثابت ولكننـا يمكن أن نحوله إلى عمـلة أخرى ، من الليرات إلى الدولارات مثلاً ، أو بالعكس ، وفق سعر معين تماماً .

هذا وفي الجبال الروسية الواقعية حيث يحول الاحتكاك دون بلوغ العربة ، أثناء تسلقها ، ارتفاعاً يساوي علو قمة انطلاقها ، يوجد دوماً تبادل مستمر بين الطاقة الحركية والطاقة الكامنة . لكن مجموعهما لايبقى ثابتاً أثناء الحركة بل يتناقص . وما علينا ، وقد بلغنا هذه المرحلة المتقدمة من التأمل ، سوى أن نتسلح بالشجاعة كي نخطو خطوة مهمة تخمينية تتولد فيها صلة وثيقة بين المظهر الميكانيكي والمظهر الحراري في الحركة . وسنرى فيما بعد خصوبة نتائج هذه الخطوة وتعميمها .

إن شيئاً جديداً ، غير الطاقة الحركية وغير الطاقة الكامنة ، قد تسلل الآن إلى الحركة : إنه الحرارة المتولدة عن الاحتكاك . فهل تنشأ هذه الحرارةعلى حساب الطاقة الميكانيكية ، أي الحركية والكامنة ؟ إن بوادر تخمين جديد تلوح الآن في الأفق . إذا كانت الحرارة نوعاً من أنواع الطاقة فربما ظل مجموع الطاقات الثلاث ، الحرارية والحركية والكامنة ، ثابتاً . وعندئذٍ لاتكون الحرارة وحدها ، بل هي وجميع أنواع الطاقة الأخرى ، متضامنة كهيولة واحدة غير قابلة للفناء . وهذا يشبه حال رجل خص نفسه بعمـلة بالفرنكات اقتطعها من مبلغ بالدولار حوَّل جزءاً منه إلى ليرات ووضع الفرنكـات جانبـاً . فإذا كانت أسعـار التحويل فيما بين العملات الثلاث ثابتة فإن قيمة مجموع الدولارات والليرات والفرنكات تظل ثابتة .

إن تقدم العـلم قد أعدم مفهوم الهيولة الحرارية المستقـلة . ونحاول الآن أن ننشـىء هيولة جديدة هي الطاقة التي تشكل الحرارة أحد مظاهرها .

نسبــة القيمتيــن

لقد كان ماير Mayer أول من أصدر ، منذ مئة سنة ، أول تخمين أفضى إلى مفهوم الحرارة كشكل من أشكال الطاقة ؛ وقد تأكد هذا التخمين في مخابر جول Joule ، وإن من الصدف الغريبة أن يكون جل العمل الأساسي في مجال الحرارة قد قام به فيزيائيون غير محترفين كانوا يتخذون الفيزياء نوعاً من الهواية الممتعة . فقد عمل في هذا المضمار الاسكتلندي المتقلب ، بلاك ، والطبيب الألماني ، ماير ، والمغامر الأمريكي الكبير ، الكونت رمفورد الذي عاش بعدئذٍ في أوربا وتقلد ، من جملة المنـاصب التي تقـلدها ، منصب وزير الحرب في بافاريا . وكان يوجد أيضـاً صـانع البيرة الإنكليزي ، جول الذي استغل أوقات فراغه النادرة لإجراء عدد من أهم التجارب في مجال انحفاظ الطاقة .

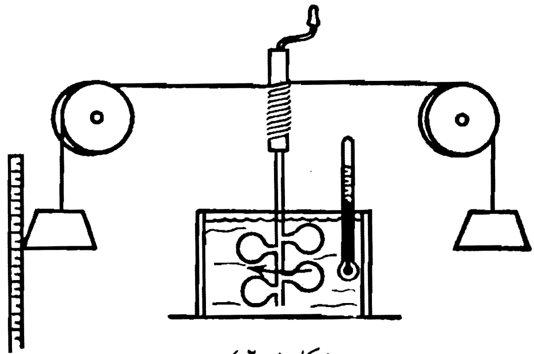
لقد تأكد جول بالتجربة من التخمين القائل بأن الحرارة شكل من أشكال الطاقة **الميكانيكية** للجملة . وفي حالة الجبال الروسية أصدرنا تخميناً بأن جزءاً من الطاقة الميكانيكة يتحول إلى حرارة . فإذا كان هذا صحيحاً فلابد من وجود نسبة تحويل(*) بينهما ، هنا وفي كل العمليات الفيزيائية المشابهة . وهذه المسألة مسألة كمية بحتة . لكن حقيقة أن كمية معلومة من الطاقة الميكانيكية تتحول إلى كمية معينة تماماً من الحرارة هي من أكثر الحقائق أهمية . ونريد الآن أن نعلم العدد الذي يعبر عن نسبة التحويل هذه ، أي أن نعلم كمية الحرارة التي نحصل عليها لدى تحويل كمية معلومة من الطاقة الميكانيكية إلى حرارة .

إن تعيين هذا العدد كان هدف أبحاث جول . وكانت آلية عمله في تجاربه تشبه كثيراً آلية عمل ميقاتية الجدار التي يحركها ثقل . فتعبئة هذه الميقاتية تعود إلى رفع ثقلين من مكان قريب من الأرض إلى مكان أعلى منه ، فنعطي بهذه العملية إلى جملة الميقاتية طاقة كامنة (كما تكتسب العربة في الجبال الروسية طاقة كامنة عندما تتسلق إلى القمة) . وإذا تركنا الميقاتية وشأنها فإنها تصبح جملة معزولة ، ويعود الثقلان إلى المكان الأخفض وتتوقف الميقاتية عن العمل . فماذا حدث لطاقة الثقلين الكامنة ؟ لقد تحولت إلى طاقة حركية في أحشاء الميقاتية ثم تبددت تدريجياً على شكل حرارة .

وبإدخال تعديل مناسب على هذه الآلية تمكن جول من قياس الحرارة ، وتمكن بالتالي من حساب نسبة القيمتين . كان جهازه يتضمن ثقلين يهبطان على طول مسطرتين شاقوليتين (شكل ٢٠) وكان يدير بيده جذعاً مجهزاً بأجنحة جانبية مغمورة في حوض ماء مغلق وعازل للحرارة . وعندئذٍ يصعد الثقلان فيكتسبان طاقة كامنة تتحول أثناء هبوطهما إلى طاقة حركية تحرك الأجنحة وتتحول بالتدريج إلى حرارة تسخن الماء وترفعه إلى درجة حرارة أعلى يقيسها ميزان الحرارة المغمور فيه . فمن معرفة ازدياد درجة حرارة الماء وبمعرفة حرارته النوعية (وكانت معلومة في ذلك الوقت) حسب جول كمية الحرارة التي امتصها الماء . وقد أوجز نتائج تكرار هذه التجربة بالنص التالي :

١ ــ إن كمية الحرارة الناتجة عن الاحتكاك فيما بين الأجسام ، صلبة كانت أم سائلة ، هي دوماً متناسبة مع كمية القوة المبذولة . (وكلمة قوة ، عند جول ، تعني طاقة) .

(*) كنسبة تحويل الدولار إلى ليرة بفارق واحد هو أن نسبة تحويل الطاقة الميكانيكية إلى حرارة تظل ثابتة ، إذ لايوجد في الفيزياء سوق بورصة تتغير فيها أسعار العملات . (المترجم) .



شكل (٢٠)

٢ ــ إن كمية الحرارة القادرة على رفع درجة حرارة ليبرة من الماء (وزنها في الخلاء وفي درجة حرارة تتراوح بين ٥٠ و ٦٠ درجة) درجة واحدة على سلم فارنهايت يستلزم توليدها صرف قوة ميكانيكية (طاقة) تتمثل بهبوط ٧٧٢ ليبرة مسافة قدرها قدم واحدة .

أي أن الطاقة الكامنة لـ ٧٧٢ ليبرة ، موضوعة على ارتفاع قدم واحدة عن الأرض ، تعادل كمية الحرارة اللازمة لزيادة درجة حرارة ليبرة من الماء ، من ٥٥ إلى ٥٦ درجة فارنهايت(*) . هذا ولئن كانت التجارب الحديثة تقيس هذا التحويل بدقة أكثر فإن تعيين المعادل الميكانيكي للحرارة هو ، وبكل جدارة ، من منجزات جول .

وانطلاقاً من هذا الإنجاز العظيم راح العلم يتقدم بخطى سريعة . فقد تبين أن هذين النوعين من الطاقة ، الميكانيكي والحراري ، ليسا سوى شكلين من أشكال عديدة منها . أي أن كل ما يمكن أن يتحول إلى أحد هذين النوعين هو شكل آخر من أشكال الطاقة . فالإشعاع الصادر عن الشمس طاقة ، لأنه يتحول إلى حرارة عندما يصل إلى الأرض . والتيار الكهربائي يملك طاقة لأنه يسخن السلك الذي يمر فيه أو يحرك دواليب المحركات . والفحم يختزن طاقة بشكل كيميائي تنطلق على شكل حراري عندما يحترق . وكل الحوادث في الطبيعة تتضمن طاقة تتحول من شكل لآخر . وكل واحد من التحولات يتم دوماً بموجب نسبة معينة تماماً . وفي الجملة المادية المعزولة (المغلقة أمام أي تأثير خارجي) تحافظ الطاقة المحتواة فيها على مقدارها ، فهي من هذه الناحية

(*) إن درجة واحدة من سلم فارنهايت الحراري تساوي تقريباً ٠,٥٥ درجة من السلم المئوي الشائع الاستعمال اليوم . (المترجم) .

تتصرف كهيولة : أي أن مجموع كل أشكال الطاقة فيها يظل ثابتاً رغم أن كمية كل شكل منها قد تتغير . فإذا اعتبرنا العالم الكوني بأجمعه جملة معزولة (ويكاد يكون هذا تحصيل حاصل) أمكننا أن نعلن بكل فخر ، نحن فيزيائيي القرن التاسع عشر ، أن طاقة العالم الكلية لاتتغير ، أي أنه لايمكن لأي جزء منها أن يفنى ، ولا أن تتخلق في العالم طاقة إضافية .

نحن الآن بين مفهومين للهيولة هما **المادة والطاقة** . وكلاهما تخضعان إلى قانون الانحفاظ : أي أن الجملة المعزولة لايمكن أن تتغير ، لا في كتلتها ولا في طاقتها . والمادة تتمتع ، كما نعلم ، بوزن بينما الطاقة محرومة منه . فلدينا إذن مفهومان مختلفان وقانونا انحفاظ اثنان . فهل يجب أن نستمر في حمل هذه الأفكار على محمل الجد ؟ أم أن هذه الصورة ، المتماسكة في ظاهرها ، قد تغيرت في ضوء المكتشفات الحديثة ؟ الواقع أنها تغيرت . والتغيرات التي طرأت فيما بعد على هذين المفهومين ، المادة والطاقة ، تنجم عن نظرية النسبية . وسنعود إلى هذا الموضوع فيما بعد .

الخلفية الفلسفية

إن النتائج التي توصل إليها البحث العلمي تتطلب ، في غالب الأحيان ، أن نعيد النظر في الرؤية الفلسفية لمسائل تخرج عن النطاق المحدد للعلم . فما هو هدف العلم ؟ وماذا نتطلب من نظرية تحاول أن تشرح الطبيعة ؟ إن هذه المسائل ، بالرغم من أنها تتجاوز حدود علم الفيزياء ، تتصل به اتصالاً وثيقاً ، لأن العلم هو المنبع الذي تصدر عنه المعلومات . وعلى هذا لابد للتعميات الفلسفية من أن تعتمد على النتائج العلمية . ومتى تبلورت هذه التعميات وأصبحت مقبولة فإنها غالباً ما تؤثر ، هي بدورها ، على التطور اللاحق للفكر العلمي وتدله كيف يجب أن يختار طريقه من بين الطرق الماثلة أمامه . هذا وإن التمرد المكلل بالنجاح ، ضد مفهوم شائع ، يؤدي إلى تطورات مفاجئة ، وجديدة تماماً ، تصبح مصدراً لرؤى فلسفية جديدة .

إن هذا الكلام يبدو غامضاً وغثاً إن لم ندعمه بأمثلة مستخرجة من تاريخ الفيزياء . لنحاول إذن أن نشرح الأفكار الفلسفية الأولى عن غرض العلم . إن هذه الأفكار قد أثرت في تطور الفيزياء تأثيراً كبيراً منذ قرن من الزمان ، حتى اضطر العلماء إلى نبذها اعتماداً على إثباتات جديدة ووقائع جديدة ونظريات جديدة ، أصبحت بدورها مستندات لخلفية فلسفية جديدة للعلم .

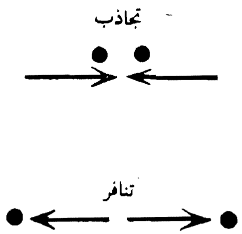
إن تاريخ العلم ، منذ فلسفة الإغريق حتى الفيزياء الحديثة ، حافل بمحاولات تهدف إلى اختصار تشابك الظواهر الطبيعية ببضعة أفكار وعلاقات أساسية . ذلك هو الهدف العميق لكل

فلسفة طبيعية . وقد عبر عنه فلاسفة الذرة منذ القديم . فقد كتب ديمقريطس منذ ثلاثة وعشرين قرناً ما يلي :

إن الحلو حلو بالاصطلاح ، والمر مر بالاصطلاح ، والساخن ساخن بالاصطلاح ، والبارد بارد بالاصطلاح ، واللون لون بالاصطلاح . لكن الواقع هو أنه لايوجد سوى ذرات وخلاء . أي أن المحسوسات حقيقية بالافتراض ، وحقيقتها عادة مكتسبة ، أما الواقع فغير ذلك . إن الحقائق ذرات وخلاء .

إن هذه الفكرة ليست ، في الفلسفة القديمة ، سوى وهم وخيال . فقوانين الطبيعة ، وهي التي تربط ما بين الحوادث المتتابعة ، لم تكن معروفة عند الإغريق . أما العلم الذي أنشأ صلة بين النظرية والتجربة فقد بدأ مع أعمال غاليله . ولقد تتبعنا الأفكار الموجهة الأولية التي انتهت بنا إلى قوانين الحركة . وخلال قرنين من البحوث العلمية ظلت القوة والمادة المفهومين الخلفيين لكل المحاولات في فهم الطبيعة . ومن المستحيل تصور إحداهما دون الأخرى لأن المادة يثبت وجودها ، كمصدر للقوة ، من خلال فعلها في مادة أخرى .

لنتأمل في المثال البسيط التالي : جسيان تؤثر فيا بينهما قوى . إن أبسط ما نستطيع أن نتصور هي قوى التجاذب والتنافر . وفي كلتا الحالتين يكون شعاعا القوتين محمولين على المستقيم الواصل بين النقطتين الماديتين . فتوخي البساطة يقود إلى صورة الجسيمين المتجاذبين أو المتنافرين التالية (شكل ٢١) :



شكل (٢١)

وكل افتراض آخر يخص منحى القوتين الفاعلتين كان سيعطي صورة أعقد من هذه بكثير . فهل نستطيع ، فيما يخص طولي شعاعي القوتين ، أن نتصور افتراضاً على هذه الدرجة من البساطة ؟ فلو أردنا أن نتحاشى الفرضيات المعقدة يمكن أن نقول ما يلي : إن القوة التي تعمل بين

جسيمين معلومين تتعلق فقط بالمسافة التي تفصل بينهما ، وذلك على شاكلة قوى التثاقل . وهذا الافتراض بسيط ؛ فقد كان بإمكاننا أن نتصور قوى أعقد من هذه بكثير ، كأن نفترض أنها تتعلق ، لا بالمسافة فحسب ، بل وبسرعتي الجسيمين أيضاً . لكننا إذا اتخذنا المادة والقوة كمفهومين أساسيين نكاد لانستطيع أن نتصور افتراضاً أبسط من التالي : إن القوتين تعملان على المستقيم الواصل بين الجسيمين وتتعلق بالمسافة بينهما فقط . ولكن هل من الممكن أن نفسر جميع الظواهر الفيزيائية بواسطة قوى من هذا القبيل ؟

إن المنجزات العظيمة لعلم الميكانيك بجميع فروعه ونجاحه الباهر في خدمة علم الفلك وتطبيق قوانينه على مسائل تبدو من أصول مختلفة ، كل ذلك أسهم في تكوين الاعتقاد أن هذا العلم قادر على تفسير كل الظواهر الطبيعية بواسطة قوى بسيطة تتسلط فيما بين أشياء لامتغيرة . وخلال القرنين التاليين لعصر غاليله كانت هذه المحاولة تتجلى ، عن وعي أو غير وعي ، في جميع البحوث العلمية . وقد عبر عنها هلمهولتز Helmholtz بوضوح في منتصف القرن التاسع عشر بما يلي :

نتوصل في النهاية إلى أن اكتشاف أن مسألة علم الفيزياء تعود إلى إرجاع كل الظواهر الطبيعية إلى قوى تجاذب وتنافر لامتغيرة تتعلق شدّتها بالمسافة فقط . إن حل هذه المسألة يقود إلى فهم تام للطبيعة .

وهكذا ، في رأي هلمهولتز ، يتعين خط تطور العلم ويسير في اتجاه مرسوم :

ويكون قد أنجز مهمته عندما يصبح إرجاع الظواهر الطبيعية إلى قوى بسيطة تاماً وعندما يتجلى البرهان على أن هذا الإرجاع هو الشيء الوحيد الذي تستطيع الظواهر أن تفعله .

إن هذا الرأي يبدو ساذجاً وسخيفاً لفيزيائي القرن العشرين . فهو يجزع لمجرد التفكير بأن الرحلة العظيمة للبحث العلمي يمكن أن تنتهي في ذلك الوقت المبكر وأن يكون من الممكن أن يتم رسم صورة خالدة لهذا العالم ، لأنها لابد أن تكون صورة تافهة ولو كانت حقيقية .

ورغم أن هذه المذاهب تبغي إرجاع وصف جميع الظواهر إلى أشكال بسيطة ، فإن معرفة كيفية تعلق القوى بالمسافات ما تزال مسألة مطروحة . فمن الممكن أن يختلف هذا التعلق من ظاهرة لأخرى . لكن ضرورة إدخال أجناس شتى من القوى في تفسير ظواهر شتى ليست عملية ترضي الفكر الفلسفي . ومع ذلك فإن **النظرة الميكانيكية** ، التي عبر عنها هلمهولتز بأوضح نص ممكن ، قد لعبت دوراً هاماً في عصره ، فنشوء النظرية الحركية للمادة هي إحدى أهم المنجزات التي تأثرت بالنظرة الميكانيكية .

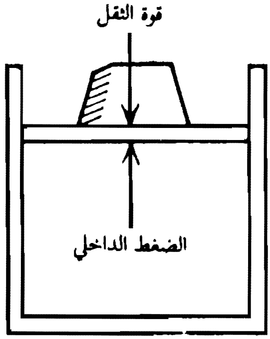
هذا وقبل أن نتكلم عن انهيارها لنقبل مؤقتاً بوجهة نظر فيزيائيي القرن الماضي ولنعرض النتائج التي يمكن استخلاصها من تصورهم للعالم الخارجي .

النظرية الحركية للمادة

هل يمكن أن نفسر الظواهر الحرارية بحركات جسيمات متفاعلة فيما بينها وبواسطة قوى بسيطة ؟ لنتأمل في كتلة غازية ، من الهواء مثلاً ، محصورة في وعاء مغلق وبدرجة حرارة ما . فبتسخين هذا الغاز نزيد في درجة حرارته وفي طاقته . ولكن ما هي الصلة بين هذه الحرارة وبين الحركة ؟ إن إمكانية وجود هذه الصلة مستوحاة ، على حد سواء ، من وجهة نظرنا الفلسفية المقبولة مؤقتاً ومما رأيناه من إمكانية إنتاج الحرارة من جراء الحركة ، فالحرارة لابد أن تكون طاقة ميكانيكية إذا كانت كل مسائل الطبيعة ميكانيكية . إن هدف النظرية الحركية هو ، بالضبط ، تقديم مفهوم للمادة ينسجم مع هذا الرأي . فالغاز ، بموجب هذه النظرية ، حشد من عدد هائل من الجسيمات ، أو **الذرات** ، تتحرك في كل الاتجاهات وتتصادم بعضاً مع بعض وتغير اتجاهها بعد كل تصادم . ولابد من وجود سرعة وسطية لهذه الذرات ، تماماً كما يوجد لأفراد أي مجتمع بشري عمر وسطي وثراء وسطي . وينجم عن ذلك وجود طاقة حركية وسطية للذرة الواحدة . وازدياد كمية الحرارة في الوعاء يعني ازدياد هذه الطاقة الحركية الوسطية . فالحرارة ، في هذه الصورة ، ليست شكلاً خاصاً من أشكال الطاقة يختلف عن الطاقة الميكانيكية . إنها بالضبط الطاقة الحركية لحركة الذرات . فبدرجة حرارة معينة تتعلق طاقة حركية وسطية معينة . وليس هذا افتراضاً اختيارياً ، فنحن مضطرون لاتخاذ الطاقة الحركية الوسطية للذرة مقياساً لدرجة حرارة الغاز ، إذا حرصنا على رسم صورة ميكانيكية معقولة للمادة .

إن هذه النظرية أكثر من عبث خيال . إذ يمكن إثبات أن النظرية الحركية للغازات لاتنسجم مع التجربة فحسب ، بل وتقود أيضاً في الواقع إلى فهم أعمق للوقائع . وهذا ما سنوضحه ببضعة أمثلة .

لدينا وعاء شاقولي مغلق بواسطة مكبس يمكن أن يتحرك بكل حرية . والوعاء يحوي كمية من الغاز نريد لها أن تظل في درجة حرارة ثابتة . فإذا كان المكبس ، في البدء ، ساكناً في موضع معين فإنه يتحرك نحو الأعلى إذا خففنا من وزنه ونحو الأسفل إذا زدنا فيه . فلدفع المكبس نحو الأسفل يجب استخدام قوة تعمل ضد الضغط الداخلي للغاز . فما هي آلية هذا الضغط الداخلي



شكل (٢٢)

بموجب النظرية الحركيـة ؟ إن عدداً هائلاً من الجسيمات التي يتـألف منهـا الغـاز تتحرك في كل الاتجاهات . فهي إذن تصدم جدران الوعاء والمكبس من الداخل وتنزو كما تنزو كرات نقذفها ضد جدار . إن هذه الصدمات المتوالية المستمرة لهذا العدد الهائل من الجسيمات على الوجه الداخلي للمكبس تجبره على البقاء على ارتفاع معين لأنها تعاكس قوة ثقل المكبس التي تسعى إلى زلقه نحو الأسفل . فقوة الثقالة تعمل دوماً في اتجاه الهبوط ، أما في اتجاه الصعود فتعمل الصدمات العشوائية التي تقوم بها الذرات الهائلة العدد . ولكي يحدث التوازن لابد للمفعول ، الحاصل على المكبس من جراء كل هذه القوى الصغيرة العشوائية ، أن يساوي مفعول قوة الثقالة .

لنفترض أن المكبس قد دُفع نحو الأسفل بحيث يضغط الغاز إلى جزء من حجمه ، ولنقل النصف ، مع بقاء درجة حرارته على قيمتها . فماذا يجب أن يحدث بموجب النظرية الحركية ؟ هل تصبح القـوة النـاجمة عن الصـدمات أكبر أم أصغر من ذي قبـل ؟ إن الجسيمات تصبح أكثر ازدحاماً . وبالرغم من أن الطاقة الحركية الوسطية تبقى على قيمتها (بسبب ثبات درجة الحرارة) فإن اصطدامات الجسيمات ضد المكبس تصبح أكثر عدداً وتصبح ، بالتالي ، القوة الكلية أكبر . فمن هذه الصورة ، التي ترسمها النظرية الحركية ، ينتج أن إبقاء المكبس في موضعه الجديد يستلزم استعمـال وزن إضـافي . إن هذا الواقع التجريبي معروف جداً لكن التنبؤ به يصدر منطقياً عن النظرية الحركية للمادة .

لنتأمل في تركيب تجريبي آخر : وعاءين يحتويان على حجمين متساويين من غازين مختلفين ، هدروجين وآزوت مثلاً ، لهما درجة حرارة واحدة . لنفترض أن الوعائين مغلقان بمكبسين متماثلين تماماً ويحملان ثقلين متسـاويين . إن هذا يعني باختصار أن للغازين حجماً واحداً ودرجة حرارة

واحدة ويعانيان ضغطاً واحداً . إن تساوي درجتي حرارتهما يعني ، بموجب النظرية الحركية ، تساوي الطاقة الحركية للجسيم الواحد . وتساوي الضغطين يعني تساوي القوتين الكليتين الراجمتين للمكبس من الداخل . فكل جسيم يحمل وسطياً الطاقة نفسها وللوعائين حجم واحد ، فينتج من ذلك أن **عدد الذرات لابد أن يكون واحداً في الوعائين** ، رغم أن الغازين مختلفان في الجنس الكيميائي . إن هذه النتيجة تفسر كثيراً من الظواهر الكيميائية فهي تعني أن عدد الذات في حجم معين وبدرجة حرارة معينة وتحت ضغط معين ليس صفة مميزة لغاز معين بنفسه بل لأي غاز . وإنه لأمر مدهش جداً أن نجد النظرية الحركية قادرة ، لاعلى التنبؤ بوجود هذا العدد فحسب ، بل وتتيح أيضاً القدرة على تعيينه . وسنعود إلى هذه النقطة بعد قليل .

إن النظرية الحركية تفسر ، كماً وكيفاً ، قوانين الغاز كما تُستخلص من التجربة ، وهي ، فوق ذلك ، لاتقتصر على الغازات بالرغم من أنها قد أحرزت في هذا المجال أعظم النجاح .

إن الغاز يمكن أن يتميع إذا خفضنا درجة حرارته . وانخفاض درجة الحرارة يعني أن جسيمات المادة تعاني تناقصاً في طاقتها الحركية الوسطية . ومن هنا يتضح أن الطاقة الحركية الوسطية للجسيم المنتمي للسائل أصغر من مثيلتها في الغاز .

إن حركة الجسيمات في السائل أمكن كشفها لأول مرة فيما يسمى **الحركة البراونية** وهي ظاهرة مثيرة كانت ستبقى دون تفسير لولا النظرية الحركية للمادة ؛ وقد لاحظها النباتي براون Brown ولم يُعرف سببها إلا بعد ذلك بثمانين سنةً ، أي في مطلع هذا القرن . والجهاز الوحيد اللازم لرؤيتها هو المجهر وليس من الضروري أن يكون كبير التجسيم جداً .

لقد كان براون يعمل على هباء غبار الطلع لبعض النباتات أي على :

جسيمات أو حبيبات ذات حجم غير عادي لأن طولها يتراوح من أربعة إلى خمسة أجزاء من ألف من البوصة .

ويقول أيضاً :

عندما كنت أفحص هذه الجسيمات السابحة داخل الماء لاحظت بوضوح أن كثيراً منها يتحرك ... وبتفحص هذه الحركات عدة مرات أيقنت أنها لايمكن أن تكون ناتجة عن تيارات في السائل ولاعن تبخره التدريجي ، ولكنها حركات تقوم بها الجسيمات من تلقاء نفسها .

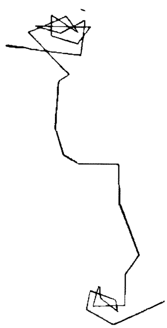
لوحــة (١)



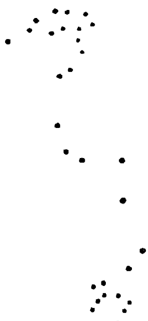
جسيمات براونية كما ترى في المجهر



المساحة التي يمسحها جسيم
براوني أثناء زمن تصوير طويل



الخط المتكسر الذي يرسمه
الجسيم البراوني في حركته



الأوضاع المتواليــة لجسيم
براوني كما ترى في المجهر

إن ما لاحظه براون كان الهياج المستمر للحبيبات المعلقة في الماء والمرئية من خلال المجهر . لقد كان منظراً مذهلاً .

هل تقتضي ملاحظة هذه الظاهرة عملية اختيار لنباتات خاصة ؟ لقد أجاب براون عن هذا السؤال بتكرار التجربة على نباتات مختلفة ؛ فلاحظ أن كل الحبيبات ، إذا كانت صغيرة لدرجة كافيـة ، تقوم بهذه الحركات عندما تكون معلقة في الماء . وقد تأكد أيضـاً أن الحركة الفوضوية المتقطعـة تصيب حبيبـات صغيرة أخرى عضوية وغير عضوية ؛ لدرجة أنه لو سحق قطعة من الحجر فإن جسيمات هذا المسحوق في الماء تتمتع بالحركة ذاتها .

كيف يجب أن نفسر هذه الحركة ؟ فقد كانت تبدو متعارضة مع كل التجارب السالفة . هذا وإن رصد هذه الحركة ، خلال ثلاثين ثانية ، يظهر مساراً فوضوياً تماماً . والشيء المذهل هو أن هذه الحركة تبدو مستمرة أبد الدهر . فالنواس المغمور في الماء لايلبث أن يتوقف عن النوسان إذا لم نصدمه مرة أخرى بقوة خارجية . ووجود حركة لاتتوقف أبداً أمر لاسابقة له . إن هذه الحركة تتفسر بشكل باهر بواسطة النظرية الحركية للمادة .

عندما نرصـد الماء بأقوى المجاهر لانرى أية ذرة متحركة بالحركة التي تتكلم عنها النظرية الحركية للمادة . فإذا صحت النظرية التي تقول بأن الماء مؤلف من حشد هائل من الجسيمات فلابد عندئذ من أن تكون هذه الجسيمات أصغر من أن ترى في أقوى المجاهر . لنظل مع ذلك واثقين بالنظرية الحركيـة ولنقبـل أنها تقدم صـورة متفقـة مع الواقع . عندئذ تتفسر الحركة البراونية بأن الجسيمات الصغيرة المرئية من خلال المجهر ترجمتها بلا هوادة جسيمات أصغر منها هي جزيئات الماء . وعلى هذا فإن الحركة البراونية لاتحدث إلا إذا كانت الجسيمات المرجومة صغيرة لدرجة كافية . وهذا الرجم يأتي من كل الجهات بسبب فوضوية حركة جزيئات الماء الراجمة . فالحركة البراونية المرصودة ليست إذن سوى نتيجة لحركة فوضوية غير مرئية . فسلوك الجسيمات المرئية يعكس ، إلى حد ما ، سلوك جزيئات الماء ويشكل لحركة هذه الجزيئات صورة مكبرة لدرجة أن ترى بالمجهر . هذا وإن التكسر الفوضوي لمسار الجسيم البراوني يعكس فوضوية مماثلة في مسارات الجزيئات التي تتألف منها المادة المائعة . وهكذا ندرك أن الدراسة الكمية للحركة البراونية تتيح لنا أن ننفذ إلى مسافات عميقة في النظرية الحركيـة للمـادة . ومن الواضح أن الحركة البراونيـة المرئيـة تتعـلق بضخامة الجزيئات اللا مرئية الراجمة . ولايمكن أن توجد حركة براونية بتاتاً لو لم تكن الجزيئات الراجمة متمتعة بطاقة حركية أي ، بتعبير آخر ، إذا لم تكن لها كتلة وسرعة . فليس من المستغرب إذن أن تؤدي دراسة الحركة البراونية إلى تعيين كتلة الجزيء الراجم .

هذا وبعد بحوث مضنية ، نظرية وتجريبية ، أمكن رسم المخطط الكمي للنظرية الحركية . وقد كان الطريق الذي شقته الحركة البراونية أحد الطرق التي قدمت معلومات كمية في هذا الصدد . وهذه المعلومات يمكن استخلاصها بطرق شتى من منطلقات عديدة . والواقع الذي يتمثل بأن كل هذه الطرق قد أكدت هذه النظريات لهو أمر هام جداً لأنه يثبت التماسك الداخلي للنظرية الحركية للمادة .

ونود أن نذكر هنا واحدة من النتائج العديدة التي أمكن الحصول عليها بواسطة التجربة والنظرية . لنفترض أننا أمام غرام واحد من الهدروجين ، أخف العناصر الكيميائية وزناً . ولنتساءل عن عدد الجسيمات المحتواة فيه . إن العدد الذي سنجده لن يكون خاصة مميزة للهدروجين وحده . بل للغازات الأخرى أيضاً لأننا عرفنا منذ قليل في أية ظروف يحتوي الغازان على عدد واحد من الجسيمات .

إن النظرية تتيح لنا أن نجيب عن هذا التساؤل بإجراء بعض القياسات في الحركة البراونية لجسيم معلق . والنتيجة عدد هائل . أي أن عدد الجزيئات في غرام واحد من الهيدروجين هو :

٣٠٣ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠

أي تقريباً ، العدد ٣ متبوعاً بـ ٢٣ صفراً .

لنتصور أن الجزيئات المحتواة في غرام واحد من الهدروجين قد تضخمت حتى أصبحت مرئية بالمجهر ؛ وأن قطر إحداها قد أصبح ، مثلاً ، جزءاً من خمسة آلاف من البوصة . أي قطر الجسيم البراوني تقريباً . فلكي نصرها بشكل مرصوص نحتاج لصندوق مكعب طول ضلعه أربعمئة متر .

يمكن أن نحسب بسهولة كتلة الجزيء الواحد من الهدروجين . إنها ، وضوحاً ، تساوي حاصل قسمة ١ غرام على العدد المكتوب أعلاه ، فنجد :

٠٫٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٣٣ غراماً

وهذا العدد الصغير لدرجة لاتصدق هو كتلة الجزيء الواحد من الهدروجين .

إن التجارب التي تناولت الحركة البراونية ليست سوى جزء من التجارب العديدة المستقلة عنها والتي قادت إلى تعيين هذا العدد الذي يلعب دوراً هاماً في الفيزياء .

وفي النظرية الحركية للمادة ، بكل الفتوحات العظيمة التي أحرزتها ، نرى تجسيداً للبرنامج الفلسفي العام الذي يتلخص بارجاع تفسير كل الظواهر إلى التفاعل فيما بين جسيمات المادة .

وبمختصر القول :

يمكن ، في علم الميكانيك ، أن نتنبأ بالمسار المستقبلي لجسم متحرك وأن نعرف مساره الماضي إذا علمنا ظروفه الحاضرة والقوى المتسلطة عليه . فكذلك ، مثلاً ، يمكن أن نتوقع المسارات المستقبلية لكل الكواكب . فالقوى الفاعلة هي قوى التثاقل النيوتنية التي تتعلق بالمسافة فقط . والنتائج العظيمة للميكانيك التقليدي توحي بأن الرؤية الميكانيكية يمكن أن تنسحب على كل فروع الفيزياء ، على حد سواء ، وأن كل الظواهر يمكن أن تفسر بفعل قوى التجاذب والتنافر التي تتعلق بالمسافة فقط وتفعل فعلها بين جسيمات لامتغيرة .

وفي النظرية الحركية للمادة نرى كيف تضم هذه الرؤية ، المتولدة من مسائل ميكانيكية ، شتات الظواهر الحرارية وترسم صورة خصبة لبنية المادة .

الفصـــل الثـانــي

انحسـار الصـورة الميكـانيكيـة

المائعان الكهربائيان ــ المائعان المغنطيسيان ــ الصعوبة الخطيرة الأولى ــ سرعة الضوء ــ الضوء كهيولة ــ لغز اللون ــ ما هي الموجة ؟ ــ النظرية الموجية للضوء ــ هل الأمواج الضوئية طولانية أم عرضانية ؟ ــ الأثير والصورة الميكانيكية .

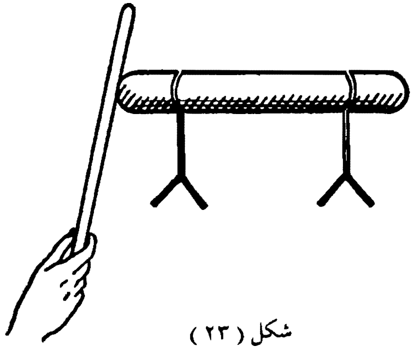
المـائعـان الكهـربائيـان

إن الصفحات التالية تحوي عرضاً غير جذاب لبعض التجارب البسيطة جداً . وسيكون مملاً ، ليس فقط لأن وصف التجارب لايضاهي في أهميته تنفيذها الفعلي بل ولأن مغزاها لايتضح إلا من خلال النظرية . وهدفنا هو تقديم مثال رائع للدور الذي تلعبه النظريات في الفيزياء .

١ ــ قضيب معدني محمول على حامل زجاجي وكل طرف منه موصول عن طريق سلك معدني إلى مكشاف التكهرب . ما هو مكشاف التكهرب ؟ إنه جهاز بسيط يتألف أساساً من وريقتـين من الذهب متدليتـين شـاقولياً في طرف قطعة معدنية ؛ وهو موضوع في صندوق من الزجاج . وقطعة المعدن لاتتصل إلا بمواد غير معدنية . وبالإضافة إلى مكشاف التكهرب وإلى القضيب المعدني لدينا عصا من المطاط الصلب وقطعة من القماش .

تجري التجربة على الشكـل التالي : نتحقق قبل كل شيء من أن الوريقتين في كل طرف تتدليان متوازيتين ، لأن هذا الوضع هو وضعهما الطبيعي . وإذا لم تكونا كذلك فما علينا سوى أن نلمس القضيب المعدني باليد لإعادتهما إلى الوضع الشاقولي . ندلك بعدئذ العصا المطاطية دلكاً

شديداً بقطعة القماش ونمس بها القضيب المعدني ؛ فنشـاهد أن الورقتين تنفرجان فوراً وتظلان هكذا حتى ولو أبعدنا العصا عن القضيب .



شكل (٢٣)

٢ ــ نقوم الآن بتجربة أخرى مستعملين الأشياء نفسها ، والورقتان متوازيتان شـاقولياً . ولكننا هذه المرة لانمس القضيب المدلوك بالعصا مباشرة بل نمسك بها قريبة منه . فنرى من جديد أن الورقتين تنفرجان ؛ لكنهما تعودان إلى وضعهما الطبيعي فوراً عندما نبعد العصا ولم تكن قد لامست القضيب .

٣ ــ لنفرض الآن أن القضيب مصنوع من قطعتـين متلامستين . ندلك العصـا بقطعة القماش ثم نقربها من القضيب فتنفرج الورقتان كما ذكرنا . ولكن لنفصل الآن ، وقبل إبعاد العصا ، قطعتي القضيب واحدة عن الأخرى ثم لنبعد العصا ؛ نلاحظ أن الورقتين تظلان منفرجتين في هذه الحالة بدل أن تعودا إلى وضعهما الطبيعي كما حدث في التجربة الثانية . (شكل ٢٤) .

إن من المستبعد أن نهتم بحماسة بهذه التجارب البسيطة الساذجة . ولو كان الذي أجراها قد أجراها في العصور الوسطى لحوكم وأدين . أما نحن اليوم فتبدو لنا مملة ومناقضة للمنطق . وقد يكون من الصـعب ، بعد قراءة هذا العرض ، أن نكررها دون أن نشعر بالحيرة . لكن الفكرة النظرية تجعلها كلها معقولة . ويمكن أن نقول أكثر من ذلك : قلما نتصور أن يكون الدافع لإجراء مثل هذه التجارب تسلية عرضية دون أن تكون عندنا أفكار أولية مسبقة عن مغزاها .

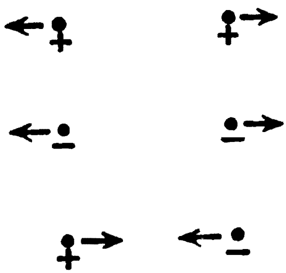


شكل (٢٤)

سنعرض الآن الأفكار الكامنة في أساس نظرية بسيطة جداً وساذجة تفسر كل **الوقائع** المذكورة .

يوجد مائعان كهربائيان ، يدعى أحدهما **موجباً** (+) والآخر **سالباً**(−) ، **لهما** بنوع ما صفة هيولية بالمعنى الذي شرحناه من قبل ، أي أن كمية كل منهما يمكن أن تزداد وأن تنقص لكن مجموعهما في جملة معزولة يظل ثابتاً . على أنه يوجد فرق أساسي بين هذه الحالة وبين حالة الحرارة أوالمادة اوالطاقة . فلدينا هنا هيولتان كهربائيتان ، ويستحيل استعمال التشبيه السابق بالعملة النقدية(اللهم إلا إذا عممناه بشكل أو بآخر) . يكون الجسم حيادياً من الناحية الكهربائية إذا كان المائعان الكهربائيان يعدمان بعضهما . نقول عن رجل أنه لايملك شيئاً إذا كان لايملك شيئاً فعلاً أو إذا كانت ديونه تساوي ما يملكه . ويمكن أن نشبه المائعين الكهربائيين بحقلي الدخل والمصروف في سجله .

والافتراض الثاني في النظرية هو أن مائعين كهربائيين من جنس واحد يتنافران ، بينما هما يتجاذبان إذا كانا من جنسين مختلفين . وهذا ما يمكن تمثيله بالشكل ٢٥ :



شكل (٢٥)

وأخيراً يجب أيضاً أن نقبل الافتراض الثالث التالي : يوجد نوعان من الأجسام ، الأجسام التي يمكن أن يتحرك فيها المائعان الكهربائيان بحرية فتسمى **ناقلة** وتلك التي لاتتمتع بهذه الخاصة . وتسمى **عازلة** . وكما يحدث غالباً في مثل هذه الأحوال ، فإن هذا التقسيم لايجب أن يُتخذ بالمعنى الجامد ، لأن الناقل أو العازل المثالي وهم لايمكن أن يتحقق . فالمعادن والأرض والجسم البشري نماذج من النواقل رغم أنها ليست بسوية واحدة من الجودة . والزجاج والمطاط والبرصلان نماذج من العوازل . أما الهواء فعازل رديء كما يعلم كل من جرب أن يقوم بالتجارب التي ذكرناها . وإنها لذريعة سهلة أن نتهم رطوبة الهواء التي تزيد في ناقليته كلما حصلنا على نتيجة سيئة في تجارب الكهرباء الراكدة .

إن هذه الافتراضات النظرية كافية لتفسير التجارب الثلاث المذكورة . وسنناقشها الآن مرة أخرى بالترتيب في ضوء نظرية المائعين الكهربائيين .

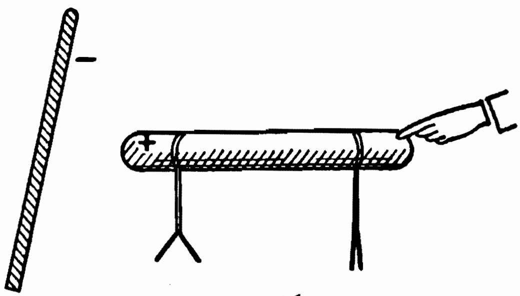
١ ـ إن العصا المطاطية ، ككل الأجسام الأخرى في الظروف الطبيعية ، حيادية كهربائياً . وهي تحتوي على المائعين ، السالب والموجب ، بكميتين متساويتين . وعندما ندلكها بقطعة القماش نفصل أحد المائعين عن الآخر . إن هذا القول مجرد اصطلاح ؛ لأنه أسلوب كلامي تعتمده النظرية للتعبير عن نتيجة عملية الدلك . والجنس الكهربائي الذي تتملكه العصا بعد الدلك ، زيادة عن الآخر ، يسمى سالباً ؛ وهذه التسمية هي أيضاً عملية اصطلاحية . فإذا كنا قد أجرينا التجربة على عصا من الزجاج مدلوكة بجلد الهر لكنا سمينا هذه الزيادة ، بموجب الاصطلاح المعتمد ، موجبة . لنستمر في التجربة ولنمنح القضيب المعدني ، بلمسه بالعصا المطاطية ، مائعاً كهربائياً إضافياً . يتحرك عندئذٍ هذا المائع ويتوزع على سطح المعدن كله بما فيه وريقتا الذهب . ولما كان المائع السالب يدفع المائع الذي من جنسه فإن الوريقتين تنفرجان إلى أبعد حد ممكن ، وهذا هو الانفراج الذي نلاحظه . ولما كان المعدن مستنداً على حامل عازل ، هو الزجاج هنا ، فإن هذا المائع يبقى عليه بمقدار الزمن الذي تسمح به ناقلية الهواء . وهكذا نفهم الآن وجوب لمس المعدن باليد قبل أن نمسه بالعصا المدلوكة . ذلك لأن المعدن وجسم الإنسان والأرض تشكل معاً وعاءً ناقلاً واحداً يتوزع المائع على سطحه فلايصيب الوريقتين منه شيء يذكر .

٢ ـ لنبدأ التجربة بالشكل الذي سبق ؛ ولكن بدلاً من أن نمس المعدن بالمطاط المدلوك نقرب هنا المطاط من المعدن دون تماس . يتحرك عندئذٍ المائعان الموجودان سلفاً في المعدن فيقترب

الموجب من المطاط ويبتعد السالب عنه . ولكنهما يعودان فيمتزجان عندما نبعد المطاط لأن المائعين المختلفين في الجنس يتجاذبان وذلك لزوال سبب انفصالهما .

٣ ـــ والآن نقسم القضيب المعدني إلى قسمين قبل أن نبعد العصا المطاطية . يستحيل عندئذٍ على المائعين المنفصلين أن يعودا إلى الامتزاج ؛ مما يجعل الوريقتين تحتفظان بزيادة لأحد المائعين فتبقيان منفرجتين .

وهكذا نرى أن هذه النظرية تفسر وقائع التجارب الثلاث . والحق أن هذه النظرية تفسر كثيراً من الوقائع في مضمار « الكهرباء الراكدة » . لكن الغرض من كل نظرية هو أن توجه خطانا نحو وقائع جديدة وأن توحي لنا بتجارب جديدة وأن ترشدنا إلى إكتشاف ظواهر جديدة وقوانين جديدة . وهذا مايمكن أن نوضحه في المثال التالي . لنفترض أننا أدخلنا تحويراً على التجربة الثانية فلمسنا القضيب الناقل بالإصبع ، وماتزال العصا المطاطية قرب الناقل . فماذا يحدث ؟ إن جواب النظرية هو : إن المائع النافر (السالب هنا) يمكنه الآن أن يسري إلى الأرض عن طريق الجسم البشري ويبقى بالنتيجة على القضيب مائع واحد (الموجب) . فالوريقتان القريبتان من العصا ، هما فقط ، اللتان تظلان منفرجتين (شكل ٢٦) . إن التجربة تشهد لصالح هذا التنبؤ بحذافيره .



شكل (٢٦)

إن النظرية التي نحن بصددها حتى الآن تبدو للفيزيائي الحديث ساذجة وغير كافية . لكننا نستطيع مع ذلك أن نستمر في استخدامها كنموذج لإيضاح الصفات المميزة لكل نظرية فيزيائية .

لايوجد في العلم نظرية خالدة . إذ يحدث دوماً أن يأتي وقت تتنبأ فيه النظرية بوقائع تنقضها التجربة . فكل النظريات تعيش فترة نمو تدريجي وتصل إلى أوجها ثم تبدأ تعاني من انحسار قد يكون سريعاً . ونمو نظرية الهيولة الحرارية وانحسارها يشكلان نموذجاً ناطقاً لهذه الظاهرة . وسنرى فيما بعد أمثلة أخرى أكثر عمقاً وأكبر أهمية . فكل خطوة عظيمة في تاريخ العلم تنشأ عن أزمة تمر بها نظرية سابقة ونحاول أن نجد لها مخرجاً من الصعوبات المعترضة . وعلينا الآن أن نتفحص الأفكار والنظريات القديمة لأنها ، رغم انتمائها إلى الماضي ، هي الوسيلة الوحيدة لفهم أهمية النظريات الجديدة ولتقدير مدى صحتها .

لقد أجرينا ، في الصفحات الأولى من هذا الكتاب ، مقارنة بين دور الباحث العلمي ودور المحقق الذي يكتشف ، بالفكر المجرد ، الحل النهائي بعد أن تجتمع لديه الوقائع اللازمة . إن هذه المقارنة سطحية في نقطة مهمة . فالجريمة ، في الحياة كما في الروايات البوليسية ، واقع مفروض ؛ وعلى المحقق أن يبحث عن الوسائل وعن البصمات وعن الرصاصات وعن الأسلحة ؛ إلا أنه يعلم ، على الأقل ، أن جريمة قد ارتكبت . لكن العلمي في وضع آخر تماماً . فليس من الصعب أن نتصور وجود إنسان لايعرف شيئاً عن الكهرباء ، والقدماء عاشوا بأفراحهم وأتراحهم دون أن يعلموا شيئاً عنها ، فاذا أعطينا هذا الإنسان معدناً ووريقات ذهبية ووعاءً زجاجياً وعصا مطاطية وقطعة قماش ، أي أدوات ضرورية لإجراء التجارب ، ورغم أن هذا الرجل قد يكون مثقفاً جداً فإن من المحتمل أن يملأ الوعاء خمراً وأن يستعمل قطعة القماش للتنظيف وأن لايخطر على باله أبداً أن يقوم بالتجارب التي أجريناها . فالجريمة لدى المحقق واقع معلوم ومسألته تتلخص في السؤال التالي : من قتل زيداً التاجر ؟ أما العالم فعليه ، في غالب الأحيان ، أن يرتكب الجريمة بنفسه وأن يقوم بالتحقيق ؛ وفوق ذلك فإن مهمته تتعدى تفسير حادث خاص ، بل تطمح إلى تفسير كل الظواهر التي رآها وكل ما يمكن أن يراه .

إن إدخال مفهوم المائعين يكشف لنا عن تأثير الأفكار الميكانيكية التي تحاول تفسير كل شيء بهيولات وقوى تؤثر فيما بينها . ولكي نرى فيما إذا كانت النظرية يمكن أن تنطبق على وصف الظواهر الكهربائية يجب أن نتأمل في المثال التالي : كريتان مشحونتان بالكهرباء ، أي تملكان زيادة لأحد المائعين الكهربائيين . نعلم أنهما تتجاذبان أو تتنافران . لكن : هل تتوقف القوة على المسافة بينهما فقط ؟ وإذا كان الأمر كذلك فكيف شكل العلاقة بينهما ؟ إن أبسط تخمين يمكن أن يخطر على البال هو أن القوة تتعلق بالمسافة بشكل يشبه قوة التثاقل التي تضعف إلى تسع شدتها عندما

تكبر المسافة إلى ثلاثة أمثالها ولقد برهنت التجارب التي أجراها كولون Coulomb على أن هذا التخمين صحيح بالفعل . وهكذا وبعد قرن من اكتشاف نيوتن لقانون التثاقل وجد كولون علاقة مماثلة فيما بين القوة الكهربائية والمسافة . أما الفروق الرئيسية بين قانوني نيوتن وكولون فهي : إن الجذب التثاقلي كائن في كل مكان . بينما لاتوجد القوى الكهربائية إلا إذا كانت الأجسام تحمل شحنات كهربائية ؛ لايوجد في التثاقل سوى قوى تجاذب بينما القوى الكهربائية تجاذبية أو تنافرية .

وهنا تبرز أيضاً المسألة التي ناقشناها بخصوص الحرارة . هل المائعان الكهربائيان هيولتان عديمتا الوزن ؟ أو ، بتعبير آخر ، هل يظل وزن قطعة المعدن على حاله عندما نشحنها بالكهرباء ؟ الواقع أن الميزان لايدل على وجود أي فرق بين الحالين : فنستنتج ، هنا أيضاً ، أن المائعين الكهربائيين عضوان من عائلة الهيولات العديمة الوزن .

ولدى التقدم على هذا الطريق نرى أن الكهرباء تتطلب مفهومين جديدين . ونريد هنا أن نتحاشى التعاريف الدقيقة وأن نلجأ إلى مفاهيم فيها بعض الشبه بمفاهيم كنا قد صادفناها . فلنستذكر ما رأيناه لدى محاولة فهم الظواهر الحرارية ، من ضرورة التمييز بين الحرارة وبين درجة الحرارة ؛ ومن المهم ، هنا أيضاً ، أن نميز بين الشحنة الكهربائية وبين الكمون الكهربائي . ويتجلى الفرق بين هذين المفهومين من خلال التشبيه التالي :

الكمون الكهربائي ـــ درجة الحرارة
الشحنة الكهربائية ـــ الحرارة

فقد يحمل الناقلان المختلفان في الحجم ، كأي كرتين مختلفتين في الكبر ، شحنتين كهربائيتين متساويتين ، أي زيادتين متساويتين من أحد المائعين الكهربائيين . لكن كمون إحداهما يختلف عن كمون الأخرى ، وكمون الكرة الصغيرة يكون أكبر من كمون الكرة الكبيرة . ذلك لأن المائع الكهربائي يكون ذا كثافة أكبر على الجسم الأصغر ، أي أنه أكثر ازدحاماً عليه . ولما كانت القوى المنفرة يجب أن تشتد بازدياد الكثافة فإن نزوع الشحنة إلى الانفلات من قيود الجسم الذي يحملها يكون أعظم لدى الكرة الصغيرة منه لدى الكرة الكبيرة . وهذا النزوع إلى الانفلات من الناقل هو قياس مباشر لكمونه . ولإيضاح الفرق بين الشحنة والكمون نسوق عدداً قليلاً من الأفكار التي تصف سلوك الأجسام الساخنة بالمقارنة مع سلوك النواقل المشحونة بالكهرباء .

الحرارة	الكهرباء
إن الجسمين ، اللذين كانا في البدء بدرجتي حرارة مختلفتين ، يصلان إلى درجة حرارة واحدة بعد زمن من وضع أحدهما بتماس مع الآخر .	إن الناقلين المعزولين ، اللذين كانا في البدء بكمونين كهربائيين مختلفين ، يصلان بسرعة كبيرة إلى كمون واحد عندما نضع أحدهما بتماس مع الآخر .
إن كميتين متساويتين من الحرارة تولدان درجتي حرارة مختلفتين على جسمين لهما سعتان حراريتان مختلفتان .	إن كميتين متساويتين من الشحنة الكهربائية تولدان تغيرين مختلفين في الكمون الكهربائي على جسمين لهما سعتان كهربائيتان مختلفتان .
إن ميزان الحرارة الذي يمس الجسم يشير ، بارتفاع عمود الزئبق فيه ، إلى درجة حرارته الخاصة ، وبالتالي إلى درجة حرارة الجسم .	إن مكشاف الكهرباء المتصل بالناقل يشير ، بانفراج ورقتيه ، إلى كمونه الكهربائي الخاص ، وبالتالي إلى الكمون الكهربائي للجسم .

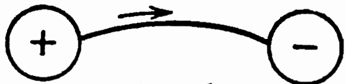
لكننا يجب أن لانتمادى في هذا التشبيه ، والمثال التالي يكشف عن أوجه الاختلاف والتشابه : إذا مس جسم حار جسماً بارداً فإن الحرارة تسري من الحار إلى البارد . لنفترض ، من جهة أخرى ، أننا إزاء ناقلين معزولين أحدهما عن الآخر ومشحونين بشحنتين متساويتين ومتعاكستين بالإشارة . ولنصطلح على أن نعتبر كمون الناقل ذي الشحنة السالبة أصغر من كمون الناقل ذي الشحنة الموجبة(*) . فإذا قربنا أحدهما حتى يمس الآخر أو وصلنا بينهما بسلك ناقل للكهرباء فإن نظرية المائعين تدل عندئذٍ على أن الناقلين يشكلان ناقلاً واحداً شحنته معدومة ، ولايبقى بينهما أي فرق كموني كهربائي . وهذا يدعو لأن نتصور أن « سيلاً » من الشحنة الكهربائية قد انتقل من جسم لآخر أثناء الفترة القصيرة التي استغرقها الكمونان حتى تساويا . ولكن كيف يحدث ذلك ؟ هل هو المائع الموجب الذي انتقل إلى الجسم السالب أم أن العكس هو الذي حدث ؟

إن ما عرضناه حتى الآن لايكفي لقول كلمة الفصل بين هذين الاحتمالين . إذ يمكن أن نفترض أياً من الإمكانيتين أو أن التدفق قد حصل في الاتجاهين معاً وفي الوقت نفسه . الحقيقة أن هذه المسألة مسألة اصطلاح ولايجب أن نحشو أي معنى في عملية الاختيار لأننا لانملك أية وسيلة لحسم هذه المسألة تجريبياً . لكن التطور اللاحق الذي أصاب علم الكهرباء قد أفضى إلى نظرية

(*) إن هذا الاصطلاح ليس أكثر من توافق رياضي . ولو اصطلحنا على عكسه لما تغير شيء في نتيجة الوقائع والنتائج التي يسوقها الكتاب . (المترجم) .

أكثر عمقاً وقدم لهذه المسألة جواباً ، وهذا الجواب يكون عديم المعنى لو أريدت صياغته في نظرية المائعين الكهربائيين البسيطة . لكننا نكتفي الآن بتقبل النص التالي : إن المائع الكهربائي يسري من الناقل ذي الكمون الأعلى إلى الناقل ذي الكمون الأخفض . وفي حالة ناقلي الشكل ٢٧ تسري الكهرباء من الموجب إلى السالب . وهذا التعبير مجرد اصطلاح وهو هنا اختياري تماماً ، وكل صعوبة تنشأ عن مقارنة الكهرباء بالحرارة ناتجة عن أن هذا التشبيه ليس تاماً مطلقاً .

وهكذا رأينا أن من الممكن تكييف الصورة الميكانيكية على صفات الوقائع الأولية في الكهرباء الراكدة . وهذا التكييف ممكن أيضاً في حالة الظواهر المغنطيسية .

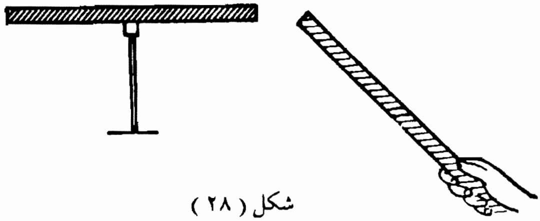


شكل (٢٧)

المائعان المغنطيسيان

سوف نتبع أسلوباً مماثلاً لما فعلناه حتى الآن ، فننطلق من وقائع بسيطة ثم نحاول إيجاد تفسير نظري لها .

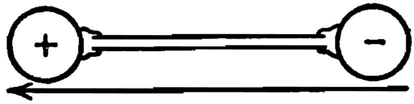
١ ــ لدينا قضيبان مغنطيسيان ، أحدهما مرتكز من وسطه حراً على حامل (شكل ٢٨) والآخر ممسوك باليد ، ونقرب أحد طرفيه من أحد طرفي الآخر بحيث نحس بتجاذب شديد بينهما . وهذا ممكن دوماً . فإذا لم يحدث تجاذب فما علينا سوى أن نقرب الطرف الآخر . وهكذا يحدث


شكل (٢٨)

شيء إذا كان القضيبان متمغنطين . ويطلق عادة على طرفي المغنطيس **اسم القطبين** . وإذا واصلنا التجربة بتحريك المغنطيس الممسوك على طول المغنطيس الآخر نلاحظ أن التجاذب يضعف حتى ينعدم عندما نصل إلى المنتصف . وإذا واصلنا التحريك نحو الطرف الآخر نلاحظ حصول تنافر يشتد تدريجياً حتى يبلغ عنفوانه عندما نصل إلى الطرف الآخر .

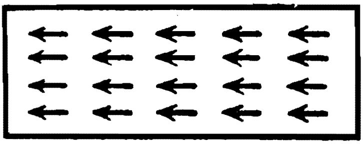
٢ ـــ إن هذه التجربة توحي بتجربة أخرى . فلكل مغنطيس قطبان ؛ أليس من الممكن أن نعزل أحدهما ؟ إن أبسط وسيلة لذلك هي أن نكسره إلى قسمين متساويين . ولقد رأينا أنه لايوجد أية قوة بين قطب مغنطيس ومنتصف مغنطيس آخر . لكننا عندما نكسر المغنطيس فعلاً نحصل على نتيجة غريبة مدهشة . ذلك أن منتصف المغنطيس قبل كسره قد أصبح بعده قطباً شديداً ، أي أن المغنطيس المكسور قد أعطانا مغنطيسين كاملين ، كل منهما ذو قطبين .

فكيف يمكن أن نفسر هذه الوقائع ؟ يمكن أن نحاول بناء نظرية في المغنطيسية على نموذج نظرية المائعين الكهربائيين . وهذا ما يوحي به واقع وجود قوى تجاذب وتنافر ، هنا كما في الكهرباء الراكدة . فنتصور ناقلين كرويين يحملان شحنتين متساويتين . وكلمة « متساويتين » تعني هنا أن لهما قيمة مطلقة واحدة ، + ٤ و — ٤ مثلاً . ونفترض أننا وصلنا بينهما بقضيب عازل ، من الزجاج مثلاً . وهذا ما يمكن أن نمثله ، تخطيطاً ، بسهم يتجه من الناقل ذي الشحنة السالبة إلى الناقل ذي الشحنة الموجبة (شكل ٢٩) . نريد أن نسمي هذه المجموعة **مُزوِج القطب الكهربائي** . ومن الواضح أن مزوجين من هذا القبيل يتصرفان كما يتصرف القضيبان المتمغنطان في التجربة الأولى ، (شكل ٢٨) . فإذا اتخذنا اختراعنا هذا كنموذج لمغنطيس فعلي أمكننا أن نقول ، مفترضين وجود مائعين مغنطيسيين ، إن المغنطيس ليس سوى **مُزوِج قطب مغنطيسي** له في طرفيه مائعان من جنسين مختلفين . إن هذه النظرية البسيطة ، المنسوخة عن النظرية الكهربائية ، كافية لتفسير التجربة الأولى ؛ إذ يوجد جذب في أحد الطرفين ودفع في الطرف الآخر وتوازن في الوسط بين قوتين متساويتين في الشدة ومتعاكستين في الاتجاه . ولكن كيف تتفسر عندئذٍ نتيجة التجربة الثانية في المغنطيس المكسور الذي يعطي مغنطيسين كاملين ؟ إن كسر القضيب الزجاجي



شكل (٢٩)

في المزوج الكهربائي يعطي قطبين منعزلين ؛ ويجب أن يكون الأمر كذلك في القضيب الحديدي للمزوج المغنطيسي ، وهذا يناقض نتيجة التجربة الثانية . إن هذا التناقض يجبرنا على اختراع نظرية أكثر براعة . فبدلاً من نموذجنا السابق يمكن أن نتخيل أن المغنطيس مؤلف من عدد من المزاوج المغنطيسية **العنصرية** التي لايمكن لأي منها أن يكسر إلى قطبين منعزلين . وفي القضيب المغنطيسي ، المعتبر كلاً قائماً بذاته ، يسود نظام تترتب فيه كل المزاوج العنصرية في اتجاه واحد (شكل ٣٠) . وبذلك نرى فوراً لماذا يظهر ، عندما نكسر المغنطيس ، قطبان جديدان في طرفي كل قطعة . وهكذا نخترع نظرية أكثر عمقاً من سابقتها وقادرة على تفسير نتائج التجربتين كلتيهما .



شكل (٣٠)

إن النظرية البسيطة الأولى تقدم تفسيراً لكثير من الوقائع ، ولاحاجة لأن نلجأ دوماً إلى نظرية أكثر عمقاً . ولنضرب مثلاً على ذلك : نعلم أن المغنطيس يجذب قطع الحديد . لماذا ؟ في قطعة الحديد العادية ينمزج المائعان المغنطيسيان بحيث لانلاحظ لهما أي أثر يذكر . وعندما نقرب منها القطب الموجب للمغنطيس فإن هذا القطب يصدر إلى المائعين « أمراً بالانفصال » ثم يجذب المائع السالب ويدفع المائع الموجب . وتكون النتيجة تجاذباً بين القطب الموجب للمغنطيس وبين المائع السالب القريب منه . ثم إذا أبعدنا المغنطيس يعود المائعان إلى الامتزاج تدريجياً وتعود قطعة الحديد إلى حالتها العادية الأولى ، وتستغرق هذه العودة زمناً يتوقف طوله على مدى ما يتبقى في ذاكرة المائعين من قوة أمر الانفصال .

لم يبق علينا ما يقال إلا القليل عن الناحية الكمية لهذه المسألة . فإذا كان لدينا قضيبان متمغنطان طويلان جداً وقربنا أحد قطبي أحدهما من أحد قطبي الآخر أمكن أن ندرس تجاذب (أو تنافر) هذين القطبين فقط ، أي بإهمال تأثيري قطبيهما الآخرين لأنهما يكونان بعيدين جداً عن منطقة تفاعل القطبين المتقاربين ، بسبب طول القضيبين الكبير . والآن ، كيف تتعلق قوة التجاذب (أو التنافر) بالمسافة بين القطبين ؟ إن الجواب الذي قدمته تجارب كولون هو أن هذه

العلاقة بالمسافة هي من شكل قانون نيوتن في التناقل ومن شكل قانون كولون في الكهرباء الراكدة .

وهكذا نرى من جديد في هذه النظرية تطبيق وجهة نظر عامة : النزوع إلى تفسير كل الظواهر بواسطة قوى تجاذب وتنافر تتعلق فقط بالمسافة وتؤثر فيما بين جسيمات خالدة .

وهناك واقع معروف جداً يجب أن لانغفل ذكره لأننا سنجد فرصة لاستخدامه . إن الأرض مزوج مغنطيسي كبير . ولايوجد أدنى تفسير لهذا الواقع . والقطب المغنطيسي السالب لهذا المزوج قريب جداً من قطب الأرض الشمالي . والقطب المغنطيسي الموجب قريب جداً من قطب الأرض الجنوبي . وما التسميتان ، سالب وموجب ، سوى مسألة اصطلاح يحسن الاتفاق عليه كي نتمكن من الدلالة على القطبين المغنطيسيين في أية حالة أخرى . فالإبرة المغنطيسية (البوصلة) الحرة الحركة حول محور شاقولي تخضع لإرادة المغنطيسية الناشئة عن هذا المغنطيس الأرضي والتي توجه القطب الموجب للبوصلة نحو الشمال ، أي نحو القطب المغنطيسي السالب للأرض .

هذا ورغم أننا نستطيع تطبيق وجهة النظر الميكانيكية دوماً في مجال الظواهر الكهربائية والمغنطيسية التي عالجناها هنا ، إلا أنه لايوجد أي داع للفخر أو للفرح بذلك . فبعض سمات هذه النظرية غير مرضية تماماً بالتأكيد إن لم نقل إنها موئسة . فهي تتضمن اختراع أجناس جديدة من الهيولات : مائعين كهربائيين ومزاوج مغنطيسية عنصرية . لقد تكاثرت الهيولات حتى بدأت تصبح ثقيلة مربكة .

القوى بسيطة : قوى التثاقل ، القوى الكهربائية ، القوى المغنطيسية ؛ ويمكن تمثيلها كلها بأسلوب واحد . لكن هذه البساطة كلفتنا ثمناً باهظاً ؛ إنه دخول هيولات جديدة عديمة الوزن . وهي أيضاً مفاهيم تكاد تكون مصطنعة ولاعلاقة لها البتة بالهيولة الأساسية : المادة .

الصعوبة الخطيرة الأولى

نحن الآن على استعداد لطرح الصعوبة الخطيرة الأولى الناشئة عن تطبيق وجهة النظر الفلسفية العامة . وسنرى فيما بعد أن هذه الصعوبة ، بالإضافة إلى صعوبة أخرى أشد خطراً ، قد تسببت في انهيار الاعتقاد بأن كل الظواهر يمكن أن تتفسر في إطار الصورة الميكانيكية .

إن التطور الهائل في علم الكهرباء ، في المجالين النظري والعملي ، بدأ مع اكتشاف التيار الكهربائي . ونصادف هنا نموذجاً من أهم النماذج في تاريخ العلم لعبت فيه الصدفة دوراً جوهرياً .

إن قصة اختلاج ساق ضفدع قد رويت بأشكال عديدة . ولئن كانت صحة تفاصيلها تحتاج إلى دليل فمما لاشك فيه أن الاكتشاف العرضي الذي لاحظه غلفاني Galvani قد قاد فولتا Volta في نهاية القرن الثامن عشر ، إلى صنع ما نسميه **بطارية فولتائية** . ورغم أنها فقدت اليوم شيوع استعمالها إلا أنها ما تزال تستخدم كوسيلة سهلة للحصول على منبع تيار كهربائي في التجارب المدرسية وفي الكتب .

إن مبدأ صنع هذه البطارية بسيط . نأخذ عدة أوان من الزجاج نسكب في كل منها ماءً نضيف إليه قليلاً من حمض الكبريت . ونغمس في كل إناء صفيحتين شاقوليتين إحداهما من النحاس والأخرى من الزنك (التوتياء) ثم نصل ، بسلك معدني ، الصفيحة النحاسية لكل إناء بالصفيحة الزنكية للإناء الذي يليه ؛ فتظل صفيحة الزنك في الإناء الأول وصفيحة النحاس في الإناء الأخير دون صلة . عندها يمكن أن نتأكد من وجود فرق بين الكمونين الكهربائيين لهاتين الصفيحتين وذلك بواسطة مكشاف كهرباء حساس إذا كان عدد العناصر ، أي عدد أواني البطارية ، كافياً .

إن السبب الوحيد لاستعمال عدة عناصر متسلسلة في البطارية هو الحصول على فرق كمون يسهل قياسه . لكن إجراء المناقشة القادمة لايستدعي أكثر من عنصر واحد يقوم مقام البطارية كلها . المهم أن كمون النحاس أعلى من كمون الزنك . وكلمة « أعلى » هنا نقصد بها معنى كلمة « أكبر » في قولنا إن + ٢ أكبر من − ٢ . فإذا وصلنا صفيحة النحاس الحرة بجسم ناقل وصفيحة الزنك الحرة بناقل آخر فإن هذين الناقلين يصبحان مشحونين ، الأول بشحنة كهربائية موجبة والآخر بشحنة سالبة . وعند هذا الحد لايظهر أي شيء هام جديد ويمكن أن نحاول تطبيق معلوماتنا السابقة عن فروق الكمون . فلقد علمنا أن فرق الكمون بين ناقلين يمكن أن ينعدم بسرعةإذا وصلنا بينهما بسلك ناقل ؛ إذ يحدث عندئذٍ أن سيلاً من المائع الكهربائي يسري من ناقل لآخر . وهذه الآلية تشبه آلية استواء درجة الحرارة بفضل السيل الحراري . ولكن هل الأمر كذلك في حالة البطارية الفولتائية ؟ لقد كتب فولتا بهذه المناسبة أن الصفيحتين تتصرفان كناقلين

قليلي الشحنة يعملان باستمرار ، أو كأنهما ينشحنان تلقائياً بعد كل انفراغ . وهذا يعني ، بموجز القول ، تولد شحنة لاحدود لها أو فعل أو حركة خالدة للمائع الكهربائي .

والنتيجة المذهلة في هذه التجارب هي أن فرق الكمون بين صفيحة النحاس وصفيحة الزنك لايضمحل رغم أن هذين الناقلين موصولان بسلك ناقل . إن فرق الكمون يظل قائماً ويجب

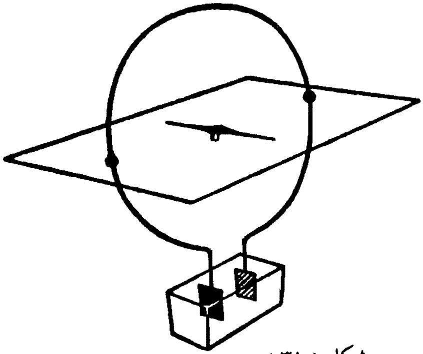
علينا ، انسجاماً مع نظرية المائعين ، أن نبحث عن سيل مستمر من الكمون الأعلى (صفيحة النحـاس) إلى الكمون الأخفض (صفيحـة الزنك) . وفي سبيل إنقاذ نظرية المائعين يمكن أن نفترض أن قوة ما تظل تعمل على انحفاظ فرق الكمون وبالتالي على استمرار تدفق المائع الكهربائي . لكن هذه الظاهرة تصبح من العجائب إذا نظرنا إليها من زاوية الطاقة . ذلك أن كمية من الحرارة تظهر في السلك الذي يحمل التيار وتكفي لصهره إذا كان دقيقاً . أي أن طاقة حرارية تتولد في السلك . لكن مجموعة البطارية والسلك تؤلف جملة مادية معزولة لأنها لاتستمد من خارجها أية طاقة . فإذا أردنا إنقاذ قانون انحفاظ الطاقة وجب علينا أن نبحث أين يحدث التحول وعلى حساب ماذا تتولد الحرارة . الواقع أنه ليس من الصعب أن نتخيل حدوث تفاعلات كيميائية معقدة داخل البطـارية . تلعب فيها صفيحتا النحاس والزنك والسـائل الذي يغمرهما دوراً فعالاً . فمن ناحية الطاقة يتمثل التحول بالسلسلة التالية : طاقة كيميائية ← طاقة المائع الكهربائي المتحرك (أي التيـار) ← طاقة حرارية . والبطـارية الفولتـائية لاتستمر في عملها إلى الأبد ، لأن التحولات الكيميائية التي تصاحب مرور التيار الكهربائي تخرب البطارية وتجعلها غير قابلة للاستعمال بعد فترة من الزمن .

إن التجربة التي وضعت العقبات الكأداء ، في طريق الأفكار الميكانيكية ، تبدو عجيبة لمن يسمع بها لأول مرة . ولقد قام بها أرستد Oersted الذي عاش في أوائل القرن الماضي ، وهو يقول :

من هذه التجـارب يبدو ثابتاً أن الإبرة المتمغنطة (البوصـلة) تنحرف عن وضع توازنها بفعل جهاز غلفاني وأن هذا المفعول يتولد عدما تكون الدارة مغلقة لا عندما تكون مفتوحة ؛ وإن تركها مفتوحة هو الذي جعل بعض الفيزيائيين المشهورين يخفقون ، منذ بضع سنوات ، في محاولات من هذا القبيل .

لنفترض أن لدينا بطارية فولتائية وسلكاً ناقلاً . لنصل السلك بصفيحة النحاس دون أن نصله بصفيحة الزنك فيتولد فرق كمون ولكن لايمكن لأي تيار أن يسري . لنحني السلك بحيث يشكل دائرة نضع في مركزها بوصلة تقع إبرتها في مستوى دائرة السلك . فلايحدث أي شيء طالما بقي الطرف الآخر للسلك دون تماس مع صفيحة الزنك : لاتأثير لفرق الكمون على إبرة البوصلة ولاقوة تفعل فيها . ويبدو من الصعب أن نفهم لماذا كان « الفيزيائيون المشهورون » ، كما ينعتهم أرستد ، يتوقعون مثل هذا التأثير .

لنصل الآن السلك بصفيحة الزنك (شكل ٣١) ، فيحدث شيء عجيب هو انحراف دوراني لإبرة البوصلة عن منحاها ؛ فيتوجه أحد قطبيها نحو القارىء إذا كان مستوي دائرة السلك



شكل (٣١)

منطبقاً على مستوي صفحة الكتاب . أي أن مفعول القوة التي تؤثر في القطب المغنطيسي للإبرة **عمودي** على مستوي دائرة السلك . ذلك هو ما لابد من استخلاصه ، من هذه التجربة ، بخصوص منحى القوة الفاعلة في الإبرة .

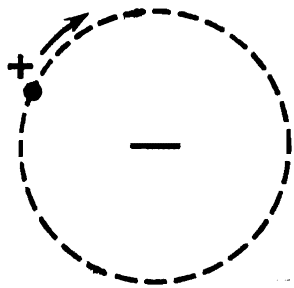
إن أهمية هذه التجربة تنبع من أنها تشكل حلقة وصل بين ظاهرتين كانتا تبدوان منفصلتين تماماً ، وهما المغنطيسية والتيار الكهربائي . ولكنها تكشف عن شيء أكبر أهمية من ذلك بكثير وهو أن القوة بين القطب المغنطيسي للإبرة وبين أجزاء السلك الصغيرة ، التي يسير التيار على طولها ، لاتقع على أي من المستقيمات التي تصل الإبرة بنقاط السلك ، أي المستقيمات التي تصل ما بين جسيمات المائع الكهربائي والمزاوج المغنطيسية العنصرية . لكن تلك القوة عمودية على هذه المستقيمات . وهكذا وللمرة الأولى نصادف قوة تختلف تماماً عما يجب أن نتوقعه من العالم الخارجي بموجب الصورة الميكانيكية . ونحن ما نزال نتذكر أن قوة التثاقل والقوة الكهربائية والقوة المغنطيسية ، التي تطيع قوانين نيوتن وكولون ، تؤثر على طول المستقيم الذي يصل بين الجسمين فيتجاذبان أو يتنافران . فلماذا لم يكن الأمر كذلك هنا ؟

وتتفاقم هذه الصعوبة بعد تجربة أخرى قام بها رولاند **Rowland** بكثير من البراعة منذ مئة سنة تقريباً . وبصرف النظر عن التفاصيل الفنية يمكن تلخيصها بما يلي : لنتصور كرية مشحونة بالكهرباء ومتحركة بسرعة كبيرة راسمة دائرة يوجد في مركزها إبرة متمغنطة . إنها مبدئياً تجربة أرستد مع فارق وحيد هو أننا هنا امام شحنة كهربائية تقوم بحركة ميكانيكيةبدلاً من تيار

كهربائي . وقد حصـل رولاند على نتيجة مماثلة تماماً لما يحدث في تجربة أرستد : أي أن الإبرة المغنطيسية تنحرف نحو منحى عمودي على مستوي دائرة حركة الكرية .

لنجعل الآن الكرية تدور بسرعة أكبر ، فنلاحظ أن القوة التي تؤثر في قطبي الإبرة تصبح أشد ، مما يجعل زاوية انحراف الإبرة أكبر . وهذه الملاحظة تزيد الطين بلة : فالقوة الجديدة ليست فقط خارجة عن الخط المستقيم الذي يصـل بين الكرية والإبرة بل وتتعلق شدتها بسرعة حركة الكرية . ونحن نعلم أن الصورة الميكانيكية تستند إلى الاعتقاد بأن كل الظواهر يمكن أن تُتفسر بواسطة قوى تتوقف شدتها على المسافة فقط لا على السرعة . فنتيجة تجربة رولاند تنسف هذه العقيدة من أساسها . لكن هذا قد لايمنع من اتخاذ موقف محافظ ومن البحث عن مخرج من هذه الصعوبات في حدود الأفكار القديمة .

إن صعوبات من هذا القبيل ، الذي يشكل عقبات كأداء مفاجئة تنتصب في طريق نمو النظريات العلمية ، كثيراً ما تصادف في العلوم . وقد يحدث أن تعمياً بسيطاً لأفكار قديمة يطرح مخرجاً منها ، مؤقتاً على الأقل . وقد يبدو كافياً ، في الحالة التي نحن بصددها ، أن نوسع دائرة نظرتنا القديمة فندخل فيها قوى أكثر عمومية بين الجسيمات العنصرية . ومع ذلك فغالباً ما يستحيل ترقيع النظرية القديمة ، وتتراكم الصعوبات فتؤدي إلى انهيارها وإلى ولادة نظرية جديدة . لكن سـلوك الإبرة المغنطيسية هنا ليس السبب الوحيد في انهدام النظريات الميكانيكية التي كانت تبدو راسخة الأساس والتي أحرزت نجاحات لاتنكر . كما أن هجوماً آخر أكثر عنفاً تعرضت له في ركن آخر مختلف كلياً . لكن هذه قصة أخرى نرويها فيما بعد .



شكل (٣٢)

ســرعـة الضــوء

لنستمع في كتاب غاليله ، **علمان جديدان** ، إلى حديث بين المعلم وتلاميذه حول سرعة النور :

زاغريدو : لكن سرعة النور هذه ، من أي نوع هي وما هي قيمتها ؟ هل هي آنية أم تحتاج ، ككل حركات الأجسام الأخرى ، إلى وقت ؟ ألا يمكن حسم هذه المسألة بالتجربة ؟

سمبليشيو : إن الخبرة اليومية تدل على أن انتشار الضوء آني ؛ لأننا عندما نرى طلقة مدفع بعيد يصل النور إلى عيوننا دون أي فاصل زمني بينما يستغرق الصوت ، كي يصل إلى آذاننا ، زمناً محسوساً .

زاغريدو : حسناً يا سمبليشيو ، لكن الشيء الوحيد الذي يمكنني استخلاصه من هذه التجربة الهزيلة أن الصوت ، في طريقه إلى الأذن ، يسير بأبطأ من الضوء . وهذه التجربة لاتعلمني شيئاً عن انتشار الضوء ، هل هو آني أم أنه يتطلب ، رغم سرعته العظيمة ، زمناً ما .

سلفياتي : إن النتيجة المريبة التي تعود إليها أمثال هذه التجارب وما شابهها تدفعني إلى تخيل طريقة تسمح بأن نتأكد يقيناً فيما إذا كان البرق ، أي انتشار الضوء ، آنياً بالفعل .

ويستمر ســلفياتي في شرح طريقة التجربة . ولكي نفهم فكرته نفترض أن سرعة الضوء ليست محدودة فقط بل وصغيرة أيضاً ، أي أن حركة الضوء قد أُبطئت كما تُبطأ حركة الشريط السينمائي . ولنتصور رجلين ، **ب** و **ج** مجهزين بفانوسين مستورين وبينهما مسافة كيلومتر واحد . وقد اتفقا على أن يكشف **ب** الستار عن فانوسه وعلى أن يفعل ج مثله بمجرد أن يرى النور القادم من ب . لنفترض في « الحركة البطيئة » أن الضوء يقطع كيلومتراً واحداً في الثانية . يرسل **ب** إشارته بكشف الغطاء عن فانوسه ؛ فيرى ج هذه الإشارة بعد ثانية واحدة فيرسل جوابه فوراً ، فيتلقى **ب** إشارة هذا الجواب بعد ثانيتين من إرسال إشارته . إن هذا يعني أنه إذا كان الضوء يقطع كيلومتراً واحداً في الثانية وكان ج واقفاً على مسافة كيلومتر واحد من **ب** فستمر فترة ثانيتين بين إرسال الإشارة من **ب** واستقبال جوابها من ج . وعلى العكس من ذلك ، إذا كان **ب** يجهل سرعة النور وإذا التزم صديقه بالاتفاق المعقود بينهما وإذا رأى إشارة ج بعد ثانيتين من إرسال إشارته الخاصة ، فيحق له أن يستنتج أن سرعة الضوء تساوي كيلومتراً واحداً في الثانية .

إن التقنية التجريبية التي كانت متوفرة في عصر غاليله لاتتيح له فرصة معقولة لقياس سرعة الضوء . ففي تجربته السابقة تلك كان عليه أن يتمكن من قياس فواصل زمنية من رتبة ثلاثة أجزاء من مئة ألف جزء من الثانية !

لقد طرح غاليله مسألة تعيين سرعة الضوء لكنه لم يتمكن من حسمها . وقد يكون طرح المسألة أهم من إيجاد حل لها ، لأن الحل قد يكون مسألة مهارة رياضية أو تجريبية . إن استيلاد أسئلة جديدة وإمكانيات جديدة ، ومجابهة المسائل القديمة من زاوية جديدة ، كل هذا يتطلب خيالاً خلاقاً ويقود إلى تقدم فعلي في طريق العلم . فمبدأ العطالة وقانون انحفاظ الطاقة قد نجما حصراً عن تأملات فكرية جديدة ومبتكرة في تجارب وظواهر معروفة . وسنصادف نماذج كثيرة من هذا القبيل في الصفحات القادمة من هذا الكتاب حين نبرز الأهمية الكبيرة لمجابهة الوقائع المعروفة من زوايا جديدة وحين نعرض نظريات جديدة .

وبالعودة إلى مسألتنا البسيطة نسبياً في تعيين سرعة النور لانملك أنفسنا من الدهشة من أن غاليله لم يفكر بأن تجربته كان يمكن أن تتم بشكل أبسط وأدق وبرجل واحد ؛ وذلك بأن يستبدل بصديقه مرآة تعكس الإشارة الضوئية وتردها نحوه فور وصولها .

وقد استعمل فيزو Fizeau هذه الطريقة بعد مئتين وخمسين سنة ؛ فكان أول من قاس سرعة الضوء بتجارب مخبرية . وكان رومر Roemer قد قاسها قبله بزمن طويل بطريقة فلكية ولكن بدقة أقل .

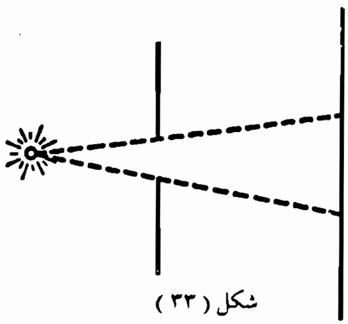
ولما كنا نعلم اليوم عظم سرعة الضوء فمن الواضح أنها لايمكن أن تقاس إلا على مسافات طويلة ، من رتبة المسافة بين الأرض وأحد كواكب المنظومة الشمسية ، أو باستخدام تقنية تجريبية متقدمة جداً . فأول طريقة كانت طريقة رومر ، والثانية طريقة فيزو . ومنذ هذه التجارب الأولى أمكن تعيين العدد الهائل ، الذي يمثل سرعة النور ، في مناسبات عديدة وبدقة متزايدة . وفي الولايات المتحدة الأمريكية اخترع مايكلسون Michelson تقنية فذة جداً يمكن شرحها بأسلوب بسيط . إن سرعة الضوء **في الخلاء** قريبة جداً من ٣٠٠ ٠٠٠ كيلومتر في الثانية الزمنية الواحدة .

الضوء كهيولة

ومن جديد ننطلق من بعض الوقائع التجريبية . إن العدد الذي أتينا على ذكره هو سرعة الضوء **في الخلاء** . إذا لم يصادف الضوء في طريقه ما يعيق مسيره فإنه يستمر بهذه السرعة في الخلاء . ونحن يمكن أن نرى من خلال وعاء زجاجي ولو أفرغناه من الهواء . ونرى أيضاً الكواكب والنجوم والسدم رغم أن نورها كان قد سافر في الفضاء الخالي . والواقع المجرد الذي يتلخص في أننا نرى الأشياء من خلال الوعاء الزجاجي سواء كان مملوءاً بالهواء أم خالياً منه ، يثبت أن وجود الهواء

لايهم إلا قليلاً . فبالإمكان إذن أن نقوم بالتجارب الضوئية في غرفة عادية فنحصل على نتيجة مطابقة لما نحصل عليه في غرفة خالية من الهواء .

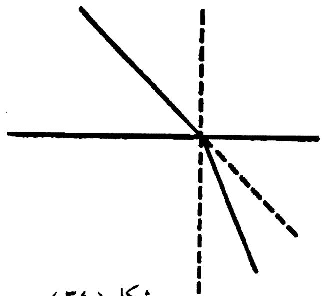
إن أكثر الوقائع بســاطة هو أن الضوء ينتشر في خط مستقيم . وهذا واضح في التجربة البدائية المرسومة في الشكل ٣٣ : فنضع أمام نقطة مضيئة لوحة فيها ثقب . والنقطة المضيئة منبع ضوئي صغير جداً ، فتحة صغيرة مثلاً في غلاف فانوس مغلق . فنلاحظ على الجدار الواقع بعيداً وراء الثقب بقعة مضيئة على أرضية مظلمة . ويشرح الشكل ٣٣ كيف نستنتج من هذه التجربة انتشار الضوء في خط مستقيم . وكل الظواهر التي من هذا القبيل ، حتى أكثرها تعقيداً ، والتي يظهر فيها ظل أو شبه ظل يمكن أن تتفسر بافتراض أن الضوء ينتشر ، في الخلاء أو في الهواء ، وفق خطوط مستقيمة .

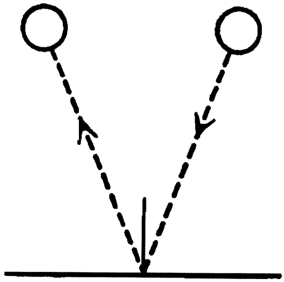


شكل (٣٣)

لنضرب مثلاً آخر ، الحالة التي يمر فيها الضوء خلال المادة . فلدينا شعاع ضوئي يسير في الخلاء حتى يسقط على صفيحة زجاجية . فماذا يحدث له ؟ إذا بقي قانون الحركة المستقيمة هنا صحيحاً فإن طريقه سيكون المستقيم المنقط في الشكل ٣٤ . لكن الواقع ليس كذلك ؛ فالمستقيم الذي يمثل مسار الشعاع الضوئي فعلاً ينعطف فجأة ليتوغل في الزجاج وفق المستقيم المستمر . وما نلاحظه هنا ظاهرة معروفة باسم **انكسار الضوء** . وما انعطاف شكل القضيب المغموس في الماء ، عند نقطة دخوله فيه ، سوى أحد مظاهر انكسار الضوء العديدة .

إن هذه الوقائع تكفينا كي نشرح كيف أمكن تخيل نظرية ميكانيكية بسيطة بخصوص


شكل (٣٤)


شكل (٣٥)

الضوء . وهدفنا هنا هو إظهار كيف تسللت إلى علم الضوء أفكار الهيولات والجسيمات والقوى ، وكيف انهارت وجهة النظر الفلسفية القديمة في نهاية المطاف .

إن النظرية تظهر هنا بأبسط أشكالها وأكثرها بدائية . لنفترض أن كل الأجسام المضيئة تصدر جسيمات ، أو **حبيبات** من الضوء تحدث ، لدى دخولها في العين ، الإحساس بالنور . ونحن قد تعودنا على إدخال هيولات جديدة ، عندما يقتضي الأمر إعطاء تفسير ميكانيكي ، لدرجة أننا لانتردد طويلاً في اللجوء إليها مرة أخرى . إن تلك الحبيبات يجب أن تتحرك في الفضاء الخالي بسرعة معلومة على خطوط مستقيمة وتحمل إلى عيوننا رسائل من الأجسام التي تصدر النور . وكل الظواهر التي تثبت انتشار النور في خط مستقيم تشهد لصالح النظرية الحبيبية ، لأن هذا النوع من الحركة هو بالضبط الأمر الذي تتلقاه الحبيبات . وهذه النظرية تفسر أيضاً وبشكل بسيط ظاهرة انعكاس الضوء عن المرآة وكأنه ارتداد كرات مطاطية نقذف بها على الأرض ، كما هو موضح في الشكل ٣٥ .

أما تفسير الانكسار فهو أصعب قليلاً . ودون أن ندخل في التفاصيل يمكن أن نرى إمكانية إعطاء تفسير ميكانيكي له . عندما تسقط الحبيبات على سطح الزجاج يمكن أن تفعل فيها قوة تنشأ عن جسيمات المادة . وهذه القوة تؤثر فقط ، وهذا أمر عجيب ، عند الجوار المباشر للمادة . والقوة عندما تؤثر في جسيم متحرك تحرفه ، كما نعلم ، عن خط سيره . فإذا كانت حصيلة القوى التي تتسلط على حبيبات الضوء قوة جذب عمودية على مستوى الزجاج فإن خط الحركة الجديد سيقع بين الخط القديم وهذا العمود . ويبدو أن هذا التفسير البسيط يبشر النظرية الحبيبية للضوء ببعض النجاح . ولكي نظهر فائدة هذه النظرية ومدى صحتها لابد ، مع ذلك ، من أن نتحرى وقائع جديدة أو أكثر تعقيداً .

لغــز اللــون

إننا ندين أيضــاً لعبقرية نيوتن بأول تفسـير لتشكيلة الألوان في هذا العالم . وهذا وصف لإحدى تجاربه نسوقه بنص نيوتن نفسه :

في عام ١٦٦٦ (وهي الفترة التي خصصتها لصقل سطوح قطع الزجاج الضوئي لإعطائها شكلاً كروياً) حصلت على موشور مثلث الوجوه من الزجاج كي أقوم بتجارب على ظواهر الألوان . وبعد أن صنعت ظلاماً في الغرفة وصنعت ثقباً في مصراع الباب يدخل منه نور الشمس وضعت موشوري أمام الثقب كي ينكسر الضوء نحو الجدار المقابل . وقد كانت في البدء تسلية ممتعة أن أتأمل الألوان الفاقعة والشديدة التي ارتسمت أمامي .

إن نور الشمس « أبيض » . لكنه بعد أن اخترق الموشور أظهر كل الألوان الموجودة في العالم المرئي . وتولد الطبيعة النتيجة ذاتها في التشكيلة الجميلة لألوان قوس قزح . أما محاولات تفسير هذه الظـاهرة فقديمة جداً . فالحكـاية الواردة في الإنجيل ، من أن قوس قزح هو علامة بين الله والإنسان ، هي « نظرية » بمعنى ما . لكنها لاتفسر بشكل مرض لماذا لايظهر هذا القوس إلا لماماً وإلا مرتبطاً بوجود المطر . أما معالجة لغز اللون برمته بأسلوب علمي فكانت وللمرة الأولى أحد منجزات نيوتن الذي دل أيضاً على طريق حله .

إن إحدى حـافتي قوس قزح حمراء دوماً ؛ والحافة الأخرى بنفسجيـة دوماً . وبين هـذين اللونين تصطف كل الألوان الأخرى . إن التفسير الذي أعطاه نيوتن يقول : إن كل لون موجود سلفاً في النور الأبيض . وهي تخترق كلها معاً الفضاء بين الكواكب والجو الأرضي وتولد إحساساً باللون الأبيض . فهذا الضوء الأبيض هو إذن مزيج حبيبات من أجناس مختلفة تنتمي إلى ألوان مختلفة . وهي تنفصل في الفراغ بواسطة الموشور في تجربة نيوتن . وبموجب النظرية الميكانيكية ينجم الانكسار عن قوى تؤثر في جسيمات الضوء وتصدر عن جسيمات الزجاج . وتتفاوت هذه القوى في شـدتها حسب اللون ، فتبلغ شدتها العظمى على البنفسجي والصغرى على الأحمر . وهكذا ينكسر كل لون وفق طريق خاص به وينفصل عن الألوان الأخرى عندما يخرج من الموشور . وفي قوس قزح تلعب قطيرات الماء دور الموشور .

وهنا تصبح النظرية القائلة بأن الضوء هيولة أكثر تعقيداً من ذي قبل . فنحن لم نعد أمام هيولة واحدة بل عدة هيولات تنتمي كل منها إلى لون معين . فإذا كانت النظرية تحوي مع ذلك قسطاً من الحقيقة فإن نتائجها يجب أن تنسجم مع الملاحظة .

إن سلسلة الألوان التي أظهرتها تجربة نيوتن في ضوء الشمس الأبيض تسمى **طيف** الشمس ، أو بتعبير أدق ، **طيفها المرئي** . وإن تحليل الضوء الأبيض إلى مركباته اللونية ، والذي أتينا على شرح طريقته في الموشور ، يسمى **تبديد** الضوء . وإذا كان الشرح الذي أعطيناه صحيحاً يجب أن نتمكن ، بواسطة موشور آخر نضمه إلى الأول بشكل ملائم ، من مزج ألوان الطيف المنفصلة من جديد . وطريقة العمل هي عكس الطريقة الأولى تماماً فنحصل من الألوان المنفصلة على مزيج أبيض . وقد أثبت نيوتن بالتجربة أن من الممكن فعلاً ، بهذه الطريقة البسيطة ، الحصول على نور أبيض من الطيف والحصول على الطيف من نور أبيض . وهذه التجارب تشكل مستنداً متيناً للنظرية القائلة بأن الحبيبات المنتمية إلى كل لون تتصرف كهيولة خالدة . وقد كتب يقول :

... وهذه الألوان لاتتخلق من جديد ، ولكنها فقط تصبح مرئية بالانفصال ؛ لأنها لو امتزجت تماماً من جديد فانصهرت معاً لولدت اللون الذي كان لها قبل الانفصال . وللسبب نفسه لاتكون التحولات الناتجة عن ضم شتى الألوان حقائق واقعية ؛ لأنه ، عندما نفصل من جديد الأشعة الضوئية المختلفة ، نرى أنها تعود فتعطي الألوان التي كانت تعطيها قبل أن تنضم معاً . وإذا مزجنا مسحوقين ناعمين جداً ، أحدهما أزرق والآخر أصفر ، مزجاً جيداً فإن المزيج يظهر للعين المجردة أخضر اللون رغم أن الحبيبات الداخلة في المزيج لم تفقد ألوانها ؛ فهي إذن لم تعانِ أي تحول فعلي ولكنها امتزجت فقط . ولو فحصنا المزيج بمجهر جيد لرأينا حبيبات زرقاء وحبيبات صفراء مختلطة بشكل فوضوي .

لنفترض أننا عزلنا عصابة ضيقة جداً من الطيف بواسطة حاجز ذي شق . أي أننا لم نسمح إلا للون واحد أن ينفذ من خلال الشق وحجبنا بالحاجز الألوان الأخرى . فالشعاع الضوئي النافذ يتألف من نور **متجانس** ، أي أن نوره لايمكن أن ينفصل إلى مركبات لونية أخرى . وهذا نتيجة للنظرية ، ويمكن أن نتأكد منه تجريبياً بسهولة ، فالشعاع المستخلص من الطيف يتألف من لون واحد ولايمكن أن ينفصل إلى ألوان أخرى بأية وسيلة . هذا ويوجد وسائل بسيطة أخرى للحصول على منبع ضوء متجانس . فالصوديوم المتوهج مثلاً يصدر نوراً أصفر متجانساً . وعندما نجري بعض التجارب الضوئية فمن المستحسن غالباً أن نستخدم نوراً متجانساً ، لأن النتيجة ستكون حتماً أكثر بساطة .

لنتخيل أن شيئاً غريباً وقع فجأة : كأن تبدأ شمسنا بإصدار نور متجانس من لون معين ، أصفر مثلاً . عندئذٍ تختفي فوراً تشكيلة الألوان التي نراها على الأرض . أي أن كل شيء سيبدو أصفر أو أسود . إن هذه النبوءة نتيجة حتمية للنظرية التي تعتبر الضوء هيولة ، لأن الألوان الأخرى لايمكن أن تتخلق . ويمكن التأكد من صحة هذه النبوءة بالتجربة . وما علينا في سبيل ذلك ،

سوى أن ننير غرفة بضوء الصوديوم المتوهج دون أي منبع ضوئي آخر فنرى كل شيء في الغرفة أصفر أو أسود . وعلى هذا فإن المجموعة الغنية للألوان في هذا العالم تعبر عن تشكيلة الألوان التي يتضمنها النور الأبيض .

إن النظرية التي تعتبر النور هيولة تبدو ذات قدرات كبيرة على تفسير كل هذه الظواهر رغم أن ضرورة إدخال عدد من الهيولات مواز لعدد الألوان يسبب لنا بعض الارتباك . كما أن الافتراض بأن كل حبيبات النور لها سرعة واحدة في الفضاء الخالي يبدو مصطنعاً جداً .

يمكن أن نتصور مجموعة أخرى من الافتراضات تشكل نظرية من نوع مختلف تماماً ولاتقل عن الأولى قدرة على تفسير كل تلك الظواهر . والواقع أننا سنشهد قريباً ولادة نظرية أخرى تنطلق من مفاهيم مختلفة تماماً ، لكنها تفسر مع ذلك كل الظواهر الضوئية . وقبل أن نصوغ الافتراضات التي تستند عليها هذه النظرية لابد لنا أن نجيب عن سؤال لايتصل مطلقاً بالاعتبارات الضوئية . وفي سبيل ذلك نطرح السؤال التالي :

ما هي الموجة ؟

خبر ينطلق من واشنطن ويصل سريعاً إلى نيويورك ، بالرغم من أن أي إنسان من الذين ساهموا في نشر هذا الخبر لم يسافر من مدينة لأخرى . وها نحن إذن إزاء حركتين مختلفتين تماماً : انتقال الخبر الذي يذهب من واشنطن إلى نيويورك ، وسفر الأشخاص الذين كان يمكن أن ينشروه . إن الريح التي تسفع حقل القمح تولد موجة تنتشر على سطح الحقل . وهنا يجب أن نميز بين حركة انتشار الموجة وحركة كل سنبلة على حدة لأن السنبلة لاتعاني سوى نوسات صغيرة . ولقد رأينا كلنا أمواجاً تنداح على شكل دوائر يتسع مداها تدريجياً عندما نرمي حجراً في بحيرة . إن من المتفق عليه أن حركة الموجة تختلف عن حركة جسيمات الماء . فجسيمات الماء تصعد وتهبط شاقولياً بينما تتوسع الموجة في المستوى الأفقي . فحركة الموجة إذن هي انتشار **لحالة** المادة وليس انتقال المادة نفسها . فقطعة الفلين الطافية على سطح الماء لاتنجرف مع الموجة بل تراوح في مكانها صعوداً وهبوطاً مصوِّرة في ذلك الحركةَ الفعلية للماء .

ولكي نفهم بشكل أحسن آلية الموجة نتأمل في تجربة جديدة مثالية . نتصور فضاءً كبيراً جداً مليئاً بالماء أو بالهواء أو بأي « وسط » آخر . ونتخيل في مركز هذا الفضاء كرة مطاطية . كل هذه الأشياء ساكنة في بدء التجربة . وفجأة تبدأ الكرة « تتنفس » بشكل إيقاعي ، فتتمدد

وتتقلص مع الاحتفاظ بشكلها الكروي . فماذا يحدث عندئذٍ في الوسط ؟ لنبدأ الفحص بمجرد أن تبدأ الكرة بالتمدد . إن جسيمات الوسط الواقعة في الجوار المباشر للكرة تندفع مبتعدة عنها فينضغط الوسط حولها . مما يزيد في كثافة القشرة الكروية المحيطة بالكرة إلى أكثر من قيمتها النظامية . وعندما تتقلص الكرة تتناقص كثافة قشرة الوسط الكروية المحيطة بها . إن هذه التغيرات الكثافية هي التي تنتشر في الوسط كله وفي جميع الاتجاهات . فالجسيمات التي يتألف منها الوسط لاتفعل أكثر من أن تهتز مراوحة في موضعها ، لكن الحركة بمجملها هي حركة موجية سائرة . والشيء الجوهري الجديد الذي نصادفه لأول مرة هنا هو حركة انتشار شيء غير مادي ؛ إنه في أعماقه انتشار **الطاقة** عبر المادة .

إن استخدام نموذج الكرة النابضة يتيح لنا أن ندخل مفهومين فيزيائيين عامين ، وهامين عند الكلام عن الأمواج . أولهما السرعة التي تنتشر بها الموجة . وهي تتعلق بجنس الوسط فتختلف مثلاً من الماء إلى الهواء . وثانيهما **طول الموجة** وهو ، في حالة الأمواج على سطح الماء ، المسافة التي تفصل بين ذروتي موجتين متواليتين ، أو بين حضيضين متواليين . وبذلك يختلف طول الموجة على سطح البحر عن طول الموجة على سطح النهر . أما في حالة الموجة الكثافية الناجمة عن كرتنا النابضة فإن طول الموجة ، في لحظة معينة ، هو المسافة التي تفصل بين قشرتين كرويتين متجاورتين وتتصفان بأن الكثافة على كل منهما عظمى (أو صغرى على كل منهما) . ومن الواضح أن هذه المسافة لاتتوقف على الوسط وحده . فإيقاع نبض الكرة له حتماً تأثير كبير : فطول الموجة يكون أقصر إذا كان النبض سريعاً ، ويصبح أكبر إذا أصبح النبض بطيئاً .

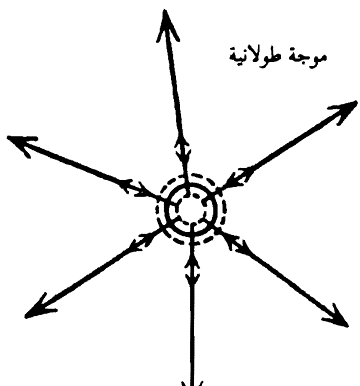
إن مفهوم الموجة هذا هو من أكثر المفاهيم خصباً في الفيزياء . وتعود هذه الظاهرة إلى حركة جسيمات هي ، بموجب النظرية الحركية ، مركبات المادة . فكل نظرية تستخدم مفهوم الموجة يمكن ، عموماً ، أن تعتبر نظرية ميكانيكية . وتفسير الظواهر الصوتية ، مثلاً ، يستند جوهرياً على هذا المفهوم . والأجسام المهتزة ، كأوتار الحلق الصوتية وأوتار العود والكمان ، هي منابع أمواج صوتية تنتشر في الهواء على شاكلة انتشار أمواج الكثافة في تجربة الكرة النابضة . وهكذا وبواسطة مفهوم الموجة أصبح بالإمكان إدخال الظواهر الصوتية في مجال النظرية الميكانيكية .

لقد ألححنا على وجوب التمييز بين حركة الجسيمات وحركة الموجة نفسها . فالموجة حالة الوسط . فهاتان الحركتان مختلفتان ؛ لكن من الواضح في حالة الكرة النابضة أن الحركتين تحدثان على خط مستقيم واحد . فجسيمات الوسط تهتز جيئةً وذهاباً على قطع مستقيمة صغيرة محمولة على

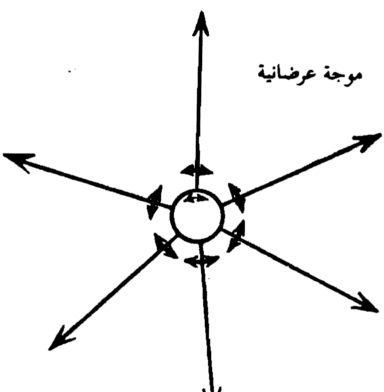
خط انتشار الموجة نفسه ، والكثافة تتزايد وتتناقص دورياً بالانسجام مع هذه الحركة . فالمنحى الذي تنتشر عليه الموجة والمنحى الذي تحصل عليه اهتزازات الجسيمات يشكلان مستقيماً واحداً (شكل ٣٦) . يقال عن هذا النوع من الأمواج إنها أمواج **طولانية** . ولكن ألا يوجد نوع آخر من الأمواج ؟ إن من المهم ، في دراساتنا اللاحقة ، أن نتوقع إمكانية حدوث نوع آخر من الأمواج توصف بأنها **عرضانية** .

لنحور مثالنا السابق . الكرة نفسها : لكنها الآن مغمورة في وسط مختلف هو نوع من الهلام بدلاً من الماء أو الهواء . وبدلاً من أن تنبض ، تدور على نفسها بزاوية صغيرة ثم تعود لتدور بزاوية صغيرة أخرى في الاتجاه الآخر ، ثم تكرر هذه الحركة بإيقاع واحد وحول محور معين واحد (شكل ٣٧) . إن الهلام لاصق بالكرة ولابد للقشرة الملاصقة من أن تقوم بحركة مماثلة . وهذه القشرة تجبر القشرة التي تليها على الحركة ذاتها . وهكذا دواليك ، قشرة بعد قشرة ، حتى تعم الحركة الوسط كله وتشكل موجة منتشرة . فإذا تذكرنا التمييز بين حركة الوسط وحركة سير الموجة نرى هنا أنهما لاتحدثان على خط واحد . فالموجة تسير على أقطار الكرة بينما تتحرك جسيمات الوسط عمودياً على منحى سير الموجة . وهكذا تتولد لدينا موجة عرضانية .

إن الأمواج التي تنتشر على سطح الماء عرضانية . لأن قطعة الفلين تعلو وتهبط في المنحى الشاقولي عندما تمر بها الموجة وهي تسير في منحى أفقي . أما الأمواج الصوتية فهي أشهر نماذج الأمواج الطولانية .



شكل (٣٦)



شكل (٣٧)

وهناك ملاحظة إضافية : إن الموجة الناشئة عن الكرة النابضة أو عن الكرة المنفتلة **هي موجة كروية** . وقد اكتسبت هذه الصفة لأن جميع النقاط الواقعة على سطح كروي مركزه مصدر الموجة تتصرف بأسلوب واحد . ففي حالة الكرة النابضة مثلاً تكون كل مناطق القشرة الكروية ذات كثافة مادية واحدة . لنعتبر الآن سطحاً من هذه السطوح الكروية بعيداً عن مصدر الموجة وقطعة صغيرة من هذا السطح . من الواضح أن هذه القطعة تشبه كثيراً منطقة مستوية . ويصبح هذا التشابه أكثر فأكثر صحة كلما كانت القطعة صغيرة المساحة وكانت الكرة عظيمة . فنحن يمكننا أن نقول إنه لايوجد فرق ملموس بين قطعة مستوية وبين قطعة صغيرة مقتطعة من سطح كرة عظيمة . وهكذا نقول عن السطوح الصغيرة المقتطعة من سطوح موجة كروية مصدرها بعيد جداً إنها **أمواج مستوية** . وكلما كانت المنطقة المخططة في الشكل ٣٨ بعيدة عن مصدر الموجة أصبحت الزاوية بين نصفي القطرين اللذين يحدانها صغيرة وأصبح هذا التمثيل للموجة المستوية صحيحاً . إن مفهوم الموجة المستوية ، ككثير غيره من المفاهيم الفيزيائية ، ليس سوى وهم لايمكن تحقيقه إلا على حساب بعض الدقة ، لكنه ، مع ذلك ، مفهوم مفيد سنحتاجه فيما بعد .



شكل (٣٨)

النظـريـة الـمـوجيـة للضــوء

لنتذكر لماذا قطعنا الحديث عن الظواهر الضوئية . لقد كنا نريد إدخال نظرية جديدة ، في طبيعة النور ، مختلفة عن النظرية الحبيبية ، لكنها تحاول تفسير الظواهر نفسها . ولهذا السبب قطعنا الحديث وأدخلنا مفهوم الموجة . ويمكن الآن أن نعود إلى موضوعنا .

يرجع الفضل إلى هويجنز Huyghens ، معاصر نيوتن ، في إبراز نظرية جديدة تماماً . فقد جاء في كتابه ، **المفصَّل في النور** ، ما يلي :

فإذا كان النور ، بالإضافة لذلك ، يستغرق زمناً لمروره ، وهذا ما سنفحصه الآن ، ينتج من ذلك أن تلك الحركة الممنوحة للمادة متتابعة وأنها ، بسبب ذلك ، تتوسع كحركة الصوت على سطوح وأمواج كروية : لأنني أسميها أمواجاً بالتشابه مع الأمواج التي نراها تتشكل على الماء عندما نرمي فيه حجراً والتي ترسم صورة توسع بتتابع دائري رغم أنها تنجم عن سبب آخر وتتولد على سطح مستو .

فالنور ، في رأي هويجنز ، موجة ؛ إنه انتقـال طاقة وليس حركة هيولة . وبما أننا رأينا أن النظرية الحبيبية تفسر كثيراً من الوقائع التي نشاهدها ، فهل النظرية الموجية قادرة على ذلك أيضاً ؟ علينا ، في سبيل الجواب عن هذا السؤال ، أن نطرح على هذه النظرية الجديدة الأسئلة التي أجابت عنها النظرية الحبيبية وسنفعل ذلك على شكل حوار بين **ن** و **هـ** ، حيث **ن** أحد أنصار نظرية نيوتن الحبيبية و **هـ** أحد أنصار نظرية هويجنز الموجية . وفي هذا الحوار لايحق لأي من النصيرين أن يسوق أدلة اكتشفت بعد وفاة هذين الأستاذين العظيمين .

ن : إن سرعة الضوء لها ، في النظرية الحبيبية ، معنى معين تماماً . إنها سرعة حركة الحبيبات في الفضاء الخالي . فماذا تعني هذه السرعة في النظرية الموجية ؟

هـ : إنها تعني بالطبع سرعة الموجة الضوئية . إن كل موجة نعرفها تنتشر بسرعة معينة ولابد أن يكون ذلك شأن الموجة الضوئية أيضاً .

ن : ليس الأمر من البساطة بالدرجة التي تظن . فالأمواج الصوتية تنتشر في الهواء ، وأمواج البحر على الماء . إن كل موجة تحتاج إلى وسط مادي كي تنتشر . والضوء ينتشر في الخلاء ، وهذا ما لاتفعله الأمواج الصوتية . وإن افتراض موجة في الخلاء يعود إلى عدم افتراض موجة بالمرة .

هـ : نعم ، أنا أعرف هذه الصعوبة ، وهي ليست جديدة علي . لقد فكر أستاذي طويلاً في هذا الموضوع ووجد أن المخرج الوحيد هو أن نتصور وجود هيولة افتراضية ، اسمها **الأثير** ، وهي وسط شفاف يملأ العالم كله . فالعالم ، يمكن أن تقول ، غارق في الأثير . فبمجرد أن نتجرأ على إدخال هذه الفكرة يصبح كل شيء واضحاً ومقنعاً .

ن : أنا لاأقبل هذه الفكرة . فهي أولاً تستلزم هيولة افتراضية جديدة ، ولدينا الآن أكثر مما ينبغي من الهيولات الافتراضية . وهناك سبب آخر لرفض هذه الهيولة . فأنت تعلم دون ريب أنه يجب تفسير كل شيء في صورة ميكانيكية . فما رأيك ، والحالة هذه ، في الأثير ؟ وهل أنت قادر على أن تقول لي كيف يتألف هو من جسيماته العنصرية وكيف يتجلى في ظواهر أخرى ؟

هـ : إن اعتراضك الأول له ، دون ريب ، ما يبرره . لكننا بإدخال الأثير العديم الوزن ، والمصطنع نوعاً ما ، نتخلص أيضاً من حبيبات الضوء ، وهي مصطنعة أكثر من ذلك بكثير . وبدلاً من أن نكون إزاء عدد كبير من الهيولات ، واحدة لكل لون ، لايبقى لدينا سوى هيولة واحدة « غامضة » . ألا تعتقد معي أن هذا تقدم حقيقي ؟ فنحن ، على الأقل ، قد جمعنا الصعوبات كلها في نقطة واحدة . ولم نعد بحاجة إلى الافتراض الزائف بأن الجسيمات المختلفة الألوان تتحرك كلها بسرعة واحدة في الفضاء الخالي . أما حجتك الثانية فصحيحة أيضاً ، لأننا لايمكن أن نجد تفسيراً ميكانيكياً للأثير . ولكن مما لاشك فيه أن الدراسة المستقبلية للظواهر الضوئية وسواها ستكشف بنيته . وما علينا الآن سوى أن ننتظر تجارب جديدة ونتائج جديدة ؛ ولكنني آمل أن نصبح ، في نهاية الأمر ، قادرين على إيضاح البنية الميكانيكية للأثير .

ن : لندع الآن هذه المسألة جانباً ، طالما لايمكن حسمها . وأريد أن أعلم ، بصرف النظر عن هذه الصعوبات ، كيف تفسر نظريتك مسائل الظواهر التي تبدو واضحة ومفهومة في ضوء النظرية الحبيبية ؛ لنطرح ، مثلاً ، واقع أن الأشعة الضوئية تسير في الخلاء وفق خطوط مستقيمة . إن الورقة البيضاء الموضوعة أمام الشمعة ترسم على الجدار ظلاً واضح الحدود . فلو كان الضوء أمواجاً لما كان الظل واضح الحدود ، لأن الأمواج تنعرج عن حواف الورقة فتجعل الظل غير واضح الحدود . فالسفينة ، كما تعلم ، لاتشكل حائلاً أمام أمواج البحر ؛ فهذه الأمواج تنعرج فتلف حول السفينة دون أن تولد ظلاً .

هـ : إن هذا ليس دليلاً مقنعاً . انظر إلى الأمواج النهرية الصغيرة عندما تضرب أحد جانبي سفينة كبيرة ؛ سترى أن الأمواج التي تتولد على يمين السفينة غير موجودة على يسارها . فإذا كانت الأمواج صغيرة والسفينة كبيرة ، يتولد ظل واضح . فمن المحتمل جداً أن يكون انتشار النور في خط مستقيم منظراً ناتجاً عن أن طول موجته صغير جداً إذا قورن باتساع الحواجز العادية والفتحات التي تعترض طريقه في تجاربنا . ومن المحتمل ، لو استطعنا صنع حواجز صغيرة لدرجة كافية ، أن لايتولد أي ظل ؛ ومن الممكن أن نصادف صعوبات تجريبية جمة في سبيل أن نرى فيما إذا كان الضوء قادراً على الإنعراج . ومع ذلك ، إذا أمكن تركيب تجربة من هذا القبيل فستكون حاسمة ، دون شك ، في الاختيار بين النظرية الموجبة والنظرية الحبيبية في طبيعة النور .

ن : من الممكن أن تقود النظرية الموجبة ، في المستقبل ، إلى وقائع جديدة ؛ لكنني لا أعرف

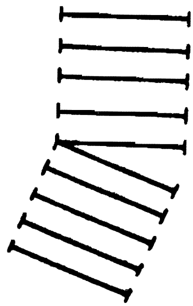
اليوم معطيات تجريبية تؤكدها بشكل مقنع . وطالما لانملك تجربة تثبت بشكل قاطع أن النور يمكن أن ينعرج فلا أرى سبباً يدعو إلى عدم الاعتقاد بالنظرية الحبيبية التي تبدو لي بسيطة وبالتالي أفضل من النظرية الموجية .

وببلوغ هذه النقطة يمكن أن نقطع الحوار رغم أن الموضوع لم يشبع بحثاً بعد .

بقي علينا أن نشرح كيف تفسر النظرية الموجية انكسار الضوء وتنوع الألوان ؛ مع العلم أن النظرية الحبيبية قادرة على ذلك . وسنبدأ بالانكسار . لكن من المفيد أن نسوق قبل ذلك مثالاً لاعلاقة له بعلم الضوء .

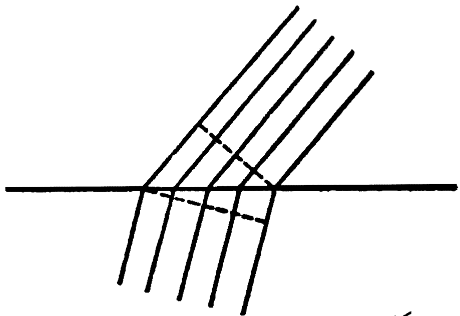
نحن إزاء فضاء واسع حر يتجول فيه رجلان مفصولان بقضيب صلب يمسك كل مهما بطرف منه . إنهما ، في البدء ، يمشيان إلى الأمام بخط مستقيم وبسرعة واحدة . فطالما كان لهما سرعة واحدة ، كبيرة أو صغيرة ، فإن القضيب ينسحب موازياً لنفسه ، فلايدور ولايغير منحاه . وكل أوضاعه المتتابعة تظل متوازية فيما بينها . لنتصور الآن أن أحد الرجلين قد أسرع في مشيه أكثر من الآخر خلال فترة زمنية قصيرة جداً لاتتجاوز جزءاً صغيراً من الثانية . ماذا يحدث عندئذٍ ؟ من الواضح أن القضيب يدور أثناء تلك الفترة بحيث لايعود ينسحب موازياً لأوضاعه السابقة . وعندما تصبح السرعتان ، بعد تلك الفترة ، متساويتين من جديد فإن منحاهما سيختلف حتماً عما كان قبل ذلك ؛ وهذا واضح في (الشكل ٣٩) . فهذا الانعطاف في منحى الحركة قد تم أثناء الفترة القصيرة التي استغرقها اختلاف سرعة الرجلين .

إن هذا المثال يتيح لنا أن نفهم انكسار الموجة . موجة مستوية تتحرك في الأثير ثم ترتطم



شكل (٣٩)

بسطح زجاجي مستو ، كما نرى في مخطط الشكل ٤٠ الذي يمثل موجة مستوية تتقدم نحو الزجاج بجبهة عريضة نسبياً . وجبهة الموجة هو مستو تتصرف فيه أجزاء الأثير ، في لحظة معينة ، بأسلوب واحد . ولما كانت السرعة تتعلق بالوسط الذي ينتشر فيه النور فإن سرعته في الزجاج تختلف عن سرعته في الفضاء الخالي (في الأثير) . فأثناء البرهة القصيرة جداً ، حين تنفذ جبهة الموجة في الزجاج ، يصبح لمختلف أجزائها سرعات متفاوتة . فالجزء الذي يصل إلى الزجاج قبل غيره يسير عندئذٍ بسرعة النور في الزجاج بينما ما تزال الأجزاء الأخرى تسير بسرعة النور في الأثير . وبسبب هذا التفاوت في السرعة بين مختلف أجزاء جبهة الموجة ، أثناء دخولها في الزجاج ، يتغير منحى الموجة نفسه .

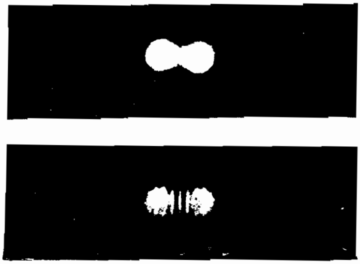


شكل (٤٠)

وهكذا نرى أن النظرية الحبيبية ليست وحدها قادرة على تفسير انكسار الضوء ، بل والنظرية الموجية أيضاً . حتى أن ثمة اعتبارات أخرى ، مصحوبة بقليل من الرياضيات ، تثبت أن التفسير الذي تقدمه النظرية الموجية أحسن وأكثر بساطة وأن نتائجها تتفق تماماً مع التجربة . إذ يوجد بالفعل طرائق كمية تتيح لنا بالمحاكمة أن نستنتج سرعة الضوء في الوسط الكاسر للضوء عندما نعلم بالقياس بأية زاوية تنعطف الموجة عند السطح الفاصل بين الوسطين . هذا وإن القياسات المباشرة تؤكد هذه التوقعات بشكل دقيق ، فتدعم النظرية الموجية بشكل باهر . بقي أن نعالج مسألة الألوان .

لنتذكر أن الموجة الواحدة تتميز بعددين : سرعتها وطولها . إن الفرضية الأساسية للنظرية الموجية في النور تقول : **إن الاختلاف في اللون يترجم عن اختلاف في طول الموجة** : فطول موجة النور الأصفر المتجانس يختلف عن طول موجة الأحمر وعن طول موجة البنفسجي . وهكذا ، بدلاً من التمييز المصطنع بين حبيبات تنتمي إلى ألوان مختلفة أصبح لدينا الاختلاف الطبيعي في طول الموجة .

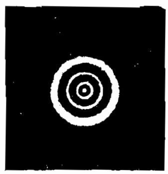
لوحة (٢)



نرى في الصورة العلوية بقعتين مضيئتين ناجمتين عن شعاعين يعبران أحد الثقبين الواحد بعد الآخر (كل ثقب مفتوح وحده بدوره ، والآخر مغلق) وعلى الصورة السفلية نرى عصابات ناجمة عن مرور الضوء من كلا الثقبين في آن واحد .



انعراج الضوء حول
حاجز صغير جداً



انعراج الضوء خلال
ثقب صغير جداً

ينتج من كل ما تقدم أن تجارب نيوتن في تبديد الضوء يمكن أن تشرح بلغتين مختلفتين : اللغة الحبيبية واللغة الموجية ، كما في المثال التالي :

اللغة الحبيبية	اللغة الموجية
إن الحبيبات المنتمية إلى ألوان مختلفة لها سرعة واحدة في الخلاء . لكن سرعاتها متفاوتة في الزجاج .	إن الأمواج المنتمية إلى ألوان مختلفة لها سرعة واحدة في الأثير . لكن سرعاتها متفاوتة في الزجاج .
إن الضوء الأبيض مزيج من حبيبات تنتمي إلى ألوان مختلفة لكنها تنفصل في الطيف .	إن الضوء الأبيض مزيج من كل الأطوال الموجية لكنها تنفصل في الطيف .

وقد يكون من الحكمة أن نتحاشى الغموض الناجم عن وجود نظريتين متمايزتين لظواهر واحدة ، وذلك بأن نقرر اختيار إحداهما بعد أن نفحص بعناية عيوب ومزايا كل منهما . لكن الحوار بين **ن** و **هـ** يدل على أن هذا الاختيار ليس بالأمر الهين . والقرار الذي سنتخذه الآن قضية ذوق وقناعة علمية . ففي عصر نيوتن ، وخلال أكثر من مئة سنة بعده ، كان أكثر الفيزيائيين يميلون إلى النظرية الحبيبية ؛ أما فيما بعد ذلك بكثير ، في منتصف القرن التاسع عشر ، فقد حكمت التجربة لصالح النظرية الموجية وضد النظرية الحبيبية . ففي الحوار الذي أوردناه يصرح **ن** أن من المحتمل ، مبدئياً ، أن تقود التجربة إلى حسم موضوع الاختيار بين النظريتين . فالنظرية الحبيبية لاتقبل احتمال أن ينعرج الضوء وتتطلب أن تكون الظلال واضحة الحدود . بينما تتنبأ النظرية الموجية أن الحاجز الصغير جداً لايولد أي ظل . ولقد تحققت هذه النبوءة تجريبياً في أعمال يونغ **Young** وفرينل **Fresnel** فاستُخلصت منها النتائج النظرية المحتومة .

كنا قد ناقشنا التجربة البسيطة التي تتلخص بثقب دائري مفتوح في حاجز موضوع أمام منبع ضوئي نقطي يسقط منه على الجدار بقعة مضيئة على أرضية مظلمة . والآن نعمد إلى تبسيط التجربة باستخدام منبع نور متجانس . وللحصول على أفضل النتائج نفترض المنبع شديد الضوء . لنتصور أن الثقب في الحاجز أصبح أصغر فأصغر . وهكذا ، بالقيام بهذه التجربة على منبع قوي وثقب صغير جداً ، نقع على ظاهرة جديدة ومدهشة ولامجال لتفسيرها في نطاق النظرية الحبيبية . ذلك أننا لانعود نرى حدوداً واضحة بين النور والظلام على الجدار . بل نرى ، في مكان البقعة المضيئة ، سلسلة حلقات مضيئة ومظلمة تتوالى على التناوب من المركز ويضعف نورها بالتدريج نحو المحيط حتى تختلط بالأرضية المظلمة . إن تفسير المساحات المنيرة والسوداء بالتناوب يصبح أكثر وضوحاً لو أجرينا التجربة بأسلوب آخر . لنفترض أن لدينا ورقة سوداء فتحنا فيها بالدبوس ثقبين

ينفذ منهما النور . فإذا كان الثقبان صغيرين جداً وكان المنبع قوياً جداً والضوء متجانساً فسيظهر على الجدار سلسلة من العصابات ، مضيئة وسوداء على التناوب ، يضعف نورها نحو الحواف حتى تختلط بالأرضية السوداء(*) . إن تفسير هذه الظاهرة بسيط . العصابة السوداء تقع في مكان تجتمع فيه ذروة الموجة القادمة من أحد الثقبين مع حضيض الموجة القادمة من الثقب الآخر فتعدم إحداهما الأخرى ويحدث في ذلك المكان ظلام . أما عند العصابة المضيئة فتلتقي معاً ذروتا الموجتين (أو حضيضاهما) القادمتين من الثقبين فيتضاعف النور في ذلك المكان . لكن تفسير الحلقات في التجربة ذات الثقب الواحد أعقد من ذلك ، بيد أن الأساس واحد . إن ظهور العصابات ، السوداء والمضيئة ، في تجربة الثقبين وظهور الحلقات ، السوداء والمضيئة ، في تجربة الثقب الواحد حادثة يجب أن نتذكرها جيداً لأننا سنعود إلى مناقشة هاتين الصورتين في المستقبل . هذا وإن هاتين التجربتين تبرهنان على **انعراج** الضوء أي على حيود انتشاره عن الخط المستقيم عندما تصادف الموجة في طريقها ثقوباً أو حواجز صغيرة .

لو أردنا استخدام الرياضيات قليلاً لأمكننا الذهاب إلى أبعد من ذلك بكثير . إذ يمكن أن نجد كبر أو بالأحرى صغر طول موجة الضوء المستعمل كي يعطي هذه الصور . فالتجارب التي أتينا على وصفها تتيح قياس طول موجة النور المتجانس الذي يصدر عن المنبع المستعمل . ولإعطاء فكرة عن صغر الأعداد التي تعبر عنها نذكر طولي موجة اللونين ، الأحمر والبنفسجي ، اللذين يحصران بينهما كل الألوان الأخرى في طيف الشمس .

طول موجة الضوء الأحمر يساوي ٠,٠٠٠٠٨ سنتيمتراً .
طول موجة الضوء البنفسجي يساوي ٠,٠٠٠٠٤ سنتيمتراً .

ولايجب أن نندهش من صغر هذه الأعداد . فظاهر الظل القاطع ، الذي يترجم عن الانتشار المستقيم للضوء ، لايرى في الطبيعة إلا لأن كل الفتحات وكل الحواجز التي يصادفها النور عادة في طريقه ذات اتساع كبير بالنسبة لأطوال أمواجه . والنور لايسفر عن طبيعته الموجية إلا عندما يلتقي فتحات وحواجز صغيرة جداً .

(*) يمكن للقارىء أن يرى مثل هذه العصابات كما يلي : يضم إصبعيه ، السبابة والوسطى ، مفتوحتين معاً ويترك بينهما فرجة ضيقة جداً ومستقيمة ، ثم يضعهما بعيداً عنه وينظر بعين واحدة إلى مصباح نيون يوازي الفرجة . فيرى الفرجة أوسع مما هي في الواقع ويرى ضمنها بضع عصابات ، سوداء ومضيئة على التناوب . (المترجم) .

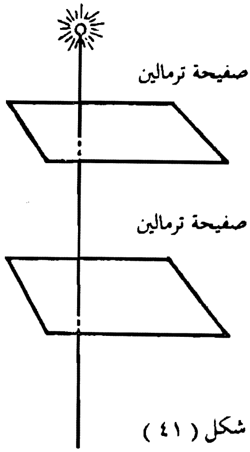
لكن قصة المحاولات لإيجاد نظرية في طبيعة الضوء لم تنته بعد . فحكم القرن التاسع عشر ليس نهائياً . لأن الفيزياء الحديثة تطرح على أصحابها السؤال من جديد . ما هي طبيعة الضوء ؟ أمواج أم حبيبات ؟ لكن هذه المسألة تبدو اليوم أكثر عمقاً وتعقيداً . بيد أننا سنقبل هزيمة النظرية الحبيبية حتى نتعرف على مشكلة انتصار النظرية الموجية .

هل الأمواج الضوئية طولانية أم عرضانية ؟

إن كل الظواهر الضوئية التي فحصناها تشهد لصالح النظرية الموجية . وأهم هذه الشواهد انكسار الضوء وانعراجه حول الحواجز الصغيرة . واسترشاداً بوجهة النظر الميكانيكية نشعر أن لابد من طرح سؤال آخر ؛ وهو يخص تعيين الخواص الكيميائية للأثير . وحل هذه المسألة الجوهرية يتطلب أن نعرف فيما إذا كانت الأمواج الضوئية فيه طولانية أم عرضانية . وبتعبير آخر هل ينتشر الضوء كما ينتشر الصوت ؟ هل الموجة الضوئية هي موجة كثافة في الأثير فتحدث اهتزازات جسيماته على منحى الانتشار ؟ أم أن الأثير يشبه الهلام المرن ، ذلك الوسط الذي لايمكن أن تتولد فيه سوى أمواج عرضانية تهتز فيها جسيماته في منحى عمودي على استقامة انتشار الموجة ؟

لنحاول ، قبل أن نحل هذه المسألة ، أن نعلم أي جواب نفضل . واضح أننا سنكون سعداء إذا كانت الأمواج الضوئية طولانية . لأن الصعوبات التي سنصادفها في توصيف أثير ميكانيكي تصبح عندئذٍ أكثر بساطة بكثير . لأن صورة الأثير ستكون ، على الأرجح ، شيئاً يشبه صورة غاز يتفسر فيها انتشار الأمواج الصوتية كأمواج كثافية . ولابد أن نجد من الأصعب أن نتخيل صورة أثير ينقل أمواجاً عرضانية . لأن تصور الأثير هلاماً مؤلفاً من جسيمات مختصة بنقل أمواج عرضانية ليس بالأمر اليسير . حتى أن هويجنز نفسه كان يعتقد أن من الخير أن يكون الأثير « أشبه بالهواء » لا « أشبه بالهلام » . لكن الطبيعة لاتعبأ بأماني البشر . فهل ستكون ، في هذا الشأن ، رحيمة بالفيزيائيين الذين يحاولون فهم كل الظواهر من خلال الصورة الميكانيكية ؟ للجواب عن هذا السؤال لابد من فحص عدد من التجارب الجديدة .

لكننا سنكتفي بأن نفحص بالتفصيل واحدة فقط من التجارب القادرة على إعطاء الجواب . لنفترض أن لدينا صفيحتين رقيقتين جداً من الترمالين مقتطعتين من هذه المادة الصلبة بشكل معين لاضرورة لشرحه هنا . وهذه المادة قليلة الشفافية ولذلك نأخذهما رقيقتين كي نرى النور من خلالهما . لنضع هاتين الصفيحتين بين العين وبين منبع ضوئي كما في الشكل ٤١ . فماذا سنرى ؟ قد تسعدنا الصدفة فنرى المنبع مضيئاً . والاعتماد على الصدفة سببه ما يلي : لنقم الآن



شكل (٤١)

بتدوير إحدى الصفيحتين بالتدريج ، وهي في مكانها موازية للصفيحة الأخرى ، حول الشعاع الضوئي الذي يصل ما بين المنبع والعين عبر الصفيحتين . أي أننا ندّور حول هذا الشعاع كل نقاط هذه الصفيحة ما عدا نقطة التقاء الشعاع بالصفيحة التي ندورها . يحدث عندئذٍ شيء عجيب ! سنرى أن النور القادم من المنبع يضعف تدريجياً حتى يختفي تماماً فلا نعود نرى المنبع . فإذا واصلنا هذا التدوير نرى النور يشتد بالتدريج حتى يعود إلى شدته الأولى فنرى المنبع من جديد كما كان . نعتقد الآن أن سبب اعتمادنا على الصدفة في بدء التجربة أصبح مفهوماً . وإذا لم تفعل الصدفة ما تمنيناه من رؤية المنبع في البدء فما علينا سوى أن نقوم بالتدوير التدريجي ، بالأسلوب نفسه ، فنرى توالي اشتداد النور واختفائه كما شرحنا .

دون أن ندخل في تفاصيل هذه التجربة ومثيلاتها العديدة يمكن أن نطرح السؤال التالي : هل يمكن تفسير هذه الظواهر لو كانت الأمواج الضوئية طولانية ؟ إننا نعلم ، في الأمواج الطولانية ، أن جسيمات الوسط تتحرك مهتزة على طول المحور وهو هنا الشعاع الضوئي الذي يصل ما بين المنبع والعين عبر الصفيحتين . فتدوير الصفيحة حول هذا المحور يجب أن لايغير شيئاً في الحركة الاهتزازية (لو كانت طولانية) للجسيمات المصطفة على طول هذا الشعاع بما فيها جسيمات الصفيحة الدوارة الواقعة عليه . وعلى هذا يجب أن لايحصل شيء من قبيل هذا التوالي في ظهور المنبع واختفائه ، أثناء تدوير إحدى الصفيحتين بالأسلوب المذكور ، لو كانت موجة الضوء طولانية .

إن هذه الظاهرة ، وكثيراً من مثيلاتها ، لايمكن أن تتفسر إلا إذا كانت الأمواج الضوئية عرضانية لاطولانية . وبتعبير آخر لابد من القول بأن بنية الأثير تشبه الهلام الدوّار .

وهكذا لم يقع ما كنا نتمناه ، وهذا أمر مؤسف ، ولكن :

ما كــل ما يتمنـــى الـــمـرء يـدركــه ... تجــري الريــاح بمـا لا تشتهي السـفـن

وعلينا أن نتهيأ لمجابهة صعوبات رهيبة في محاولة توصيف الأثير بعبارات الميكانيك .

الأثيـر والصـورة الـميكـانيكـيـة

إن مناقشة كل المحاولات المتنوعة في سبيل إدراك الطبيعة الميكانيكية للأثير ، كوسط يفيد في نقل الضوء ، ستذهب بنا بعيداً جداً . فالبنية الميكانيكية تعني ، كما علمنا ، أن الهيولة تتألف من جسيمات تتبادل فيما بينها قوى محمولة على خطوط مستقيمة ولاتتوقف شدتها إلا على المسافة . ولكي يتمكن الفيزيائيون من تصوير الأثير على شكل هيولة تشبه الهلام اضطروا إلى إصدار افتراضات قسرية ومصطنعة جداً . ونحن لانود أن نسوقها هنا ، فهي تنتمي إلى ماض نسيناه تماماً . لكن نتيجة ذلك كله كانت مهمة وعظيمة المغزى . وهي تتلخص بأن الصفة الاصطناعية لكل هذه الافتراضات ، بالإضافة إلى ضرورة إدخال عدد كبير منها لاترتبط فيما بينها أية رابطة ، كانت كافية لزعزعة الثقة بالصورة الميكانيكية من أساسها .

فالميكانيك يعلمنا أن الفضاء بين النجوم لايبدي أية مقاومة إزاء حركة الأجسام المادية فيه . فالكواكب مثلاً يجب أن تتحرك في أثير هلامي القوام دون أن تلقى منه المقاومة التي يبديها أي وسط مادي من هذا النوع . فإذا كان الأثير لايزعج المادة في حركتها فلا يمكن لجسيمات الأثير ولجسيمات المادة أن تتبادل أي تأثير فيما بينها . لكن الضوء ، وهو القادر على الانتشار عبر الأثير وعبر الزجاج والماء أيضاً ، يغير من سرعته في هاتين المادتين . فكيف نفسر هذا الواقع باللغة الميكانيكية ؟ وهل من سبيل لذلك سوى أن نفترض ضرباً من التأثير المتبادل بين جسيمات الأثير وجسيمات المادة ؟ لكن واقع الحرية الكاملة للأجسام المادية في حركتها ضمن الأثير ينفي مثل هذا الافتراض ، وبعبارة أخرى ، هل علينا أن نتقبل وجود تأثير متبادل بين الأثير والمادة في الظواهر الضوئية ، وعدم وجود تأثير متبادل بينهما في الظواهر الميكانيكية ؟ إنها لمفارقة عويصة .

يبدو أنه لايوجد سوى مخرج واحد من كل هذه الصعوبات . لقد اضطررنا ، في كل مراحل تطور العلم حتى بداية القرن العشرين وفي سبيل تفسير كل الظواهر الطبيعية بوجهة نظر

ميكانيكية ، أن نخترع هيولات مصطنعة كالموائع الحرارية والكهربائية والمغنطيسية والأثير وحبيبات النور . وكانت النتيجة أن تركزت كل هذه الصعوبات في بضعة نقاط جوهرية ، كما تركزت في مشكلة الأثير كل صعوبات الظواهر الضوئية . ففي هذه الظواهر وفي سبيل إيجاد صورة بسيطة للأثير وفي مواجهة الاعتراضات الأخرى يبدو أن كل المحاولات العقيمة تقود إلى إثبات أن كل الخطأ كامن في نقطة جوهرية أساسية واحدة ، هي افتراض إمكانية تفسير كل الظواهر الطبيعية والتجريبية في إطار الصورة الميكانيكية . لقد أخفق العلم في تنفيذ البرنامج الميكانيكي بشكل مقنع ، ولايوجد اليوم فيزيائي واحد يعتقد بإمكانية تنفيذ هذا البرنامج .

لقد صادفنا ، خلال هذا التحليل الموجز للأفكار الفيزيائية الرئيسية ، بعض المشاكل التي ظلت بدون حل ؛ واصطدمنا بصعوبات وعقبات تدفع إلى اليأس من جدوى كل محاولة تهدف إلى رسم صورة متناسقة مقنعة تضم شتات كل ظواهر العالم الخارجي . فقد شعرنا ، في الميكانيك التقليدي ، بوجود درب خفي يلوح وراء التساوي بين الكتلة العطالية والكتلة الثقالية . كما شعرنا بالصفة المصطنعة للمائعين الكهربائي والمغنطيسي . وهناك في التأثير المتبادل بين التيار الكهربائي والإبرة المغنطيسية صعوبة غير محلولة ؛ ولنتذكر أن قوة هذا التأثير لاتقع على الخط الذي يصل سلك التيار بقطب الإبرة المغنطيسي ، وأن هذه القوة تتعلق بسرعة حركة الشحنات الكهربائية ، وأن القانون الذي يتحكم بمنحاها وشدتها معقد جداً . وفي نهاية المطاف برزت مشكلة الأثير العويصة .

لقد جابهت الفيزياء الحديثة كل هذه المشاكل وحلتها . لكنها ، على طريق كفاحها في الوصول إلى الحلول ، اصطدمت بمشاكل جديدة أكثر عمقاً وأكثر حدة . إن معارفنا اليوم أوسع وأعمق من معارف فيزيائيي القرن التاسع عشر ، لكن صعوباتنا هي ، دون ريب ، أعظم من صعوباتهم بما لايقاس .

وبمختصر القول :

رأينا محاولات تهدف إلى إضفاء صبغة ميكانيكية على النظريات القديمة في الموائع الكهربائية وفي الطبيعتين ، الحبيبية والموجية ، للضوء . لكن هذه الصبغة تصادف ، في مجال الظواهر الكهربائية والمغنطيسية ، صعوبات خطيرة .

إن الشحنة الكهربائية المتحركة تؤثر في الإبرة المغنطيسية . لكن قوة التأثير هذه ، بدلاً

من أن تتعلق بالمسافة فقط ، تتعلق أيضاً بسرعة الشحنة . وهي لاتدفع ولاتجذب بل تؤثر عمودياً على الخط المستقيم الذي يصل الإبرة بالشحنة .

أما في علم الضوء فقد اضطررنا إلى أن نحكم لصالح النظرية الموجية وضد النظرية الحبيبية . إن الأمواج المنتشرة في وسط مؤلف من جسيمات ، والقوى الميكانيكية الفاعلة بين الجسيمات ، تمثل بالتأكيد صورة ميكانيكية . ولكن من أية طبيعة هو هذا الوسط الذي ينتشر فيه الضوء ، وما هي الصفات الميكانيكية لهذا الوسط ؟ واضح أن لا أمل في إمكانية إدخال الظواهر الضوئية في الصورة الميكانيكية قبل أن نجيب عن هذا السؤال . لكن الصعوبات التي تعترض حل هذه المسألة هي من العظم بحيث نضطر إلى تجنبها وإلى أن نهجر بسببها وجهة النظر الميكانيكية .

الفصـــل الثـالــث

الحقـل والنسـبيـة

الحقل كصورة تمثيلية ــ عمادا نظرية الحقل ــ واقعية الحقل ــ الحقل والأثير ــ الأثير والحركة ــ جملة المقارنة (المرجع) ــ الزمن والمسافة النسبية ــ النسبية والميكانيك ــ المتصل المكاني الزماني ــ خارج المصعد وداخله ــ الهندسة والتجربة ــ النسبية العامة وإثباتها التجريبي ــ الحقل والمادة .

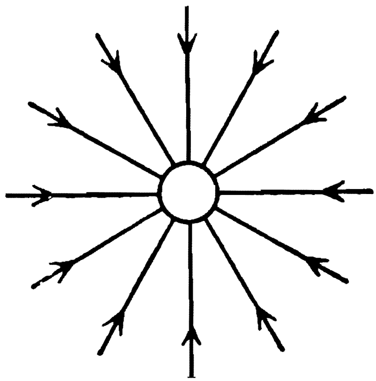
الحقـل كصورة تمثيلية

لقد دخلت في الفيزياء ، خلال النصف الثاني من القرن التاسع عشر ، أفكار جديدة ذات سمة ثورية ، شقت الطريق إلى وجهة نظر فلسفية جديدة تخالف وجهة النظر الميكانيكية . فقد قادت نتائج أعمال فارادي **Faraday** ومكسويل **Maxwell** وهرتز **Hertz** بالترتيب الزمني ، إلى تطور الفيزياء الحديثة وإلى ولادة أفكار جديدة ترسم للواقع صورة جديدة .

ومهمتنا الآن وصف الثغرة التي فتحتها هذه الأفكار الجديدة في العلم ، وإظهار الكيفية التي اكتسبت بواسطتها تدريجياً وضوحاً وقوة . وسنحاول بناء خط التقدم هذا بالترتيب المنطقي لا بالترتيب الزمني التاريخي .

لقد تولدت هذه المفاهيم الجديدة من الظواهر الكهربائية ؛ لكن من الأبسط أن ندخلها أولاً عن طريق الميكانيك . فنحن نعلم أن أي جسمين يتجاذبان ، وأن قوة هذا التجاذب تضعف عندما تزداد المسافة بينهما بصورة تناسب عكسي مع مربع هذه المسافة ؛ أي : إذا **ازدادت** المسافة إلى ثلاثة أضعافها ، مثلاً ، **نقصت** القوة إلى تسع ما كانت عليه ، يمكن أن نمثل هذا الواقع بأسلوب جديد وسنفعل ذلك حتى ولو كان من الصعب فهم أفضلية هذا التمثيل . إن الدائرة الصغيرة

المرسومة في الشكل ٤٢ تمثل جسماً جاذباً ، ولنقل الشمس . الواقع أنه يجب أن نتمثل هذا المخطط كنموذج في الفضاء وليس رسماً في مستو . فالدائرة الصغيرة تمثل كرة في الفضاء ، ولتكن الشمس . ولدينا جسم آخر صغير ، نسميه **جسيم الاختبار** ، موجود في مكان مجاور للشمس . إن هذا الجسيم سينجذب على خط مستقيم يصل بين مركزي الجسمين . فالخطوط في رسمنا هذا تدل على منحى قوة جذب الشمس من أجل أماكن مختلفة لجسيم الاختبار . أما السهم على كل خط فيدل على أن القوة تتجه نحو الشمس ، مما يعني أن القوة جاذبة . إنها **خطوط قوى حقل التثاقل** . وهذا الآن مجرد اسم ولاحاجة للإلحاح أكثر من ذلك . لكن هذا الرسم يظهر سمة مميزة سنجلوها فيما بعد . وخطوط القوة هذه مرسومة في فضاء لايحوي أية مادة أخرى . ونسميها بكل إيجاز **الحقل** . فالحقل ، في الوقت الحاضر ، لايمثل سوى سلوك جسيم الاختبار لو وُضع في جوار الكرة التي رسم هذا الحقل من أجلها .



شكل (٤٢)

إن خطوط هذا النموذج في الفضاء هي دوماً عمودية على سطح الكرة . وبما أنها تنفرج متباعدة فيما بينها عندما تنطلق من نقطة المركز فإن كثافة الخطوط تكون كبيرة بالقرب من الكرة وصغيرة في المناطق البعيدة عنها . هذا وإذا تضاعف البعد عن المركز مرتين أو ثلاثاً فإن كثافة الخطوط في الفضاء ، لكن لا في الرسم ، تصبح أصغر بأربع مرات أو تسع . فخطوط الحقل تلعب إذن دوراً مزدوجاً . فهي أولاً تدل على منحى القوة المتسلطة على جسيم الاختبار الموجود في جوار كرة الشمس ، وهي ثانياً تدل بكثافتها في الفضاء على كيفية تغير شدة القوة عندما تتغير المسافة .

فمخطط الحقل ، إذا أُحسن تفسيره ، يمثل منحى قوة التثاقل وتعلقها بالمسافة . فنحن يمكننا أن نتعلم قانون التثاقل من هذا الرسم كما نتعلمه من شرح مدلوله بالكلام أو من خلال الصيغة الرياضية الدقيقة والاقتصادية سواء بسواء . إن **التمثيل الحقلي** ، كما سنسميه ، قد يبدو واضحاً ونافعاً ولكن يجب أن لانظن أنه يشكل تقدماً فعلياً . وربما كان من الصعب أن نثبت نفعه في حالة التثاقل . فقد يرى بعضهم أن من المفيد أن نعتبر هذه الخطوط أكثر من مجرد رسم وأننا يجب أن نتمثل أن أفعال القوة تنتقل فعلاً بواسطتها . إن هذا ممكن ولكن يجب عندئذٍ أن نفترض أن سرعة انتقال هذه الأفعال على خطوط الحقل لامتناهية في الكبر . لأن القوة الفاعلة بين جسمين تتعلق ، بموجب قانون نيوتن ، بالمسافة فقط ؛ وليس للزمن دخل في ذلك . أي أن القوة يجب أن تنتقل من جسم لآخر آنياً دون إمهال . ولكن بما أن الحركة ذات السرعة اللامتناهية في الكبر عديمة المعنى لدى الإنسان العاقل فإن محاولة أن نرى ، في هذا الرسم ، غير نموذج تخطيطي محاولة لاجدوى منها .

ونحن لاننوي ، مع ذلك ، أن نناقش هنا مسألة التثاقل . فهو قد أفادنا كمدخل فقط ، وذلك بتبسيط طرائق المحاكمة المماثلة في نظرية الكهرباء .

نريد الآن أن نبدأ بمناقشة التجربة التي أثارت صعوبات خطيرة في التفسير الميكانيكي . فقد درسنا التيار الذي يسري في سلك معدني على شكل دارة دائرية . كان في مركز الدائرة إبرة مغنَطيسية . وبمجرد مرور التيار تتسلط قوة جديدة على القطب المغنطيسي عمودية على المستقيمات التي تصل نقاط السلك بالقطب . إن هذه القوة ، التي تنجم عن حركة الشحنات ، تتعلق بسرعة الشحنة كما يتضح في تجربة رولاند . وهذه الوقائع التجريبية تناقض المبدأ الفلسفي الذي يقضي بأن تكون كل القوى الفاعلة محمولة على المستقيم الذي يصل بين الجسمين المتفاعلين وأن لاتتعلق إلا بالمسافة بينهما .

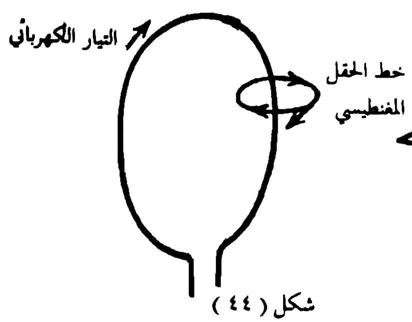
إن الصيغة الدقيقة للقوة التي يسلطها التيار على قطب مغنطيسي معقدة جداً ، أعقد بكثير من صيغة قوة التثاقل . على أننا يمكن أن نحاول جعل هذه الأفعال مرئية بالعين على طريقة إراءة قوة التثاقل . فنبدأ بالسؤال : بأية قوة يفعل التيار فعله في قطب مغنطيسي موجود في مكان ما من جواره ؟ ربما كان في توصيف هذا الفعل بالكلام بعض الصعوبة . حتى أن صيغتها الرياضية معقدة وثقيلة . وخير طريقة لذلك هي أن نمثل كل ما نعرفه عن القوى الفاعلة بالرسم ، أو ، بالأحرى بنموذج في الفضاء ذي خطوط قوى . لكن ثمة صعوبة تنشأ من واقع أن القطب المغنطيسي موجود

دوماً برفقة قطب مغنطيسي آخر يشكل معه مزوجاً مغنطيسياً . يمكننا مع ذلك أن نتصور إبرة مغنطيسية طويلة جداً لدرجة أن نكتفي بدراسة القوة التي تؤثر في القطب الأقرب إلى التيار ؛ لأن القطب الآخر يكون عندئذٍ بعيداً جداً عنه فلا تؤثر فيه قوة تذكر . ولتجنب كل غموض نقول إن القطب المغنطيسي القريب من التيار موجب .

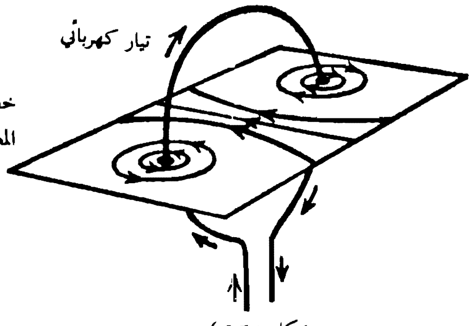
إن صفات القوة التي تؤثر في القطب المغنطيسي الموجب تظهر في الشكل ٤٣ .

نلاحظ ، قبل كل شيء ، سهماً قرب السلك يدل على جهة التيار ، من الكمون العالي إلى الكمون الضعيف . أما الخطوط الأخرى فكلها خطوط القوة المتولدة من هذا التيار والواقعة في المستوي المرسوم . ولو رسمناها بشكل ملائم لأظهرت لنا اتجاه شعاع القوة الذي يمثل فعل التيار في قطب مغنطيسي معلوم ولأعطتنا معلومات أخرى بخصوص شدة هذه القوة . والقوة ، كما نعلم ، شعاع يتطلب تعيينه أن نعرف اتجاهه وطوله معاً . وسنهتم الآن رئيسياً بمسألة منحى القوة الفاعلة في القطب . فنسأل : كيف يمكن أن نجد ، من الرسم ، منحى القوة في أية نقطة من الفراغ ؟

إن القاعدة المتبعة في استخراج منحى القوة ، على نموذج حقلي ، ليست من البساطة بالدرجة التي رأيناها في مثالنا السابق حين كانت خطوط القوة مستقيمات . ولتبسيط هذه العملية رسمنا في الشكل ٤٤ خط قوة واحداً . إن شعاع القوة محمول على المستقيم المماس لهذا الخط . وإن سهم شعاع القوة وسهم خط القوة هما من اتجاه واحد . فالقوة تؤثر إذن في هذا الاتجاه على القطب المغنطيسي الموجب إذا وُجد في تلك النقطة . فالرسم الجيد أو بالأحرى النموذج الجيد ، يخبرنا أيضاً عن شيء آخر بخصوص طول شعاع القوة في أية نقطة . إن هذا الشعاع يجب أن يكون أطول في



شكل (٤٤)



شكل (٤٣)

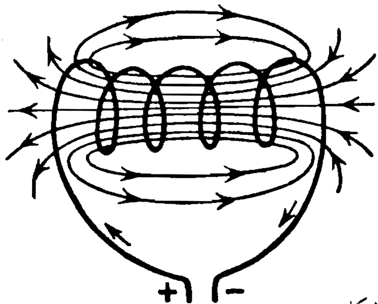
المناطق التي تكون فيها كثافة الخطوط أكبر ، أي قرب السلك ، ويقصر في مناطق الكثافة الصغيرة ، أي بعيداً عن السلك .

وبهذه الصورة فإن خطوط القوة ، أو الحقل بتعبير آخر ، تسمح بتعيين القوة الفاعلة في قطب مغنطيسي موجود في أية نقطة من الفراغ . إنها ، في الوقت الحاضر ، المبرر الوحيد لرسم الحقل بعناية . وبمعرفة ما يعنيه الحقل سنفحص ، بانتباه أعمق ، خطوط القوة الناجمة عن التيار الكهربائي . إن هذه الخطوط دوائر محيطة بالسلك وتقع في مستو عمودي على مستوي دائرة السلك . وبقراءة أوصاف القوة على الرسم نصل ، مرة أخرى ، إلى نتيجة أن القوة عمودية على المستقيم الذي يصل القطب بالسلك (في الشكل ٤٤) لأن المماس للدائرة ، في أية نقطة من محيطها ، عمودي على نصف قطرها الواصل إلى تلك النقطة . فكل ما نعرفه عن القوى الفاعلة يمكن إذن اختصاره بإنشاء خطوط الحقل . وهكذا نضع مفهوم الحقل بين مفهوم التيار ومفهوم القطب المغنطيسي كي نمثل القوى الفاعلة بأسلوب بسيط .

إن كل تيار كهربائي مصحوب بحقل مغنطيسي أي بقوة تؤثر دوماً على أي قطب مغنطيسي يقع قرب السلك الذي يسري فيه التيار . وما دمنا تعلمنا قراءة أوصاف القوى المغنطيسية على نموذج الحقل المغنطيسي للتيار ، نريد رسم الحقل المحيط بسلك التيار كي نمثل فعل القوى المغنطيسية في أية نقطة من الفراغ . لنأخذ كمثال أول ما يسمى ملفاً ؛ إنه ، كما يتضح على الشكل ٤٥ ، سلك ملفوف على شكل لولب . وهدفنا الآن هو أن نتعلم بالتجربة كل ما يمكن أن نعرفه عن الحقل المغنطيسي الناجم عن التيار المار في الملف وأن نجعل هذه المعرفة نافعة في إنشاء الحقل . إن النتيجة ممثلة في الشكل ٤٥ . إن خطوط القوة منحنيات مغلقة تحيط بالملف بأسلوب يتميز به الحقل المغنطيسي للتيار .

إن الحقل الناجم عن قضيب متمغنط (مغنطيس طويل) يمكن أن يتمثل بنفس أسلوب حقل التيار ، كما هو واضح في الشكل ٤٦ . وخطوط القوى تتجه من القطب الموجب إلى القطب السالب . وشعاع القوة محمول في كل الأحوال على المستقيم المماس لخط الحقل في كل نقطة . وهو أكثر طولاً بالقرب من القطبين لأن كثافة الخطوط أكبر عندهما . وشعاع القوة يمثل فعل المغنطيس في قطب مغنطيسي موجب . إن المغنطيس في هذه الحالة هو « منبع » الحقل لا التيار الكهربائي .

إن من المفيد جداً أن نقارن بعناية كلاً من هذين الرسمين الأخيرين بالآخر . فلدينا في أولهما

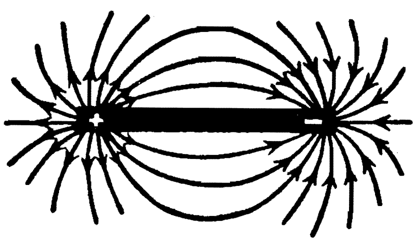


شكل (٤٥)

حقل مغنطيسي لتيار يسري في ملف ، وفي الآخر حقل قضيب متمغنط . لنهمل الملف والقضيب ولنلاحظ فقط الحقلين خارجهما . سنرى فوراً أن لهما بالضبط صفات واحدة ؛ ففي كليهما تنطلق خطوط القوة من أحد الطرفين إلى الآخر .

إن هذا التمثيل للحقل يعطي ثماره الأولى . لقد كان من الصعب أن نتوقع تشابهاً قوياً بين الملف الذي يسري فيه تيار كهربائي وبين قضيب مغنطيسي ، لو لم يكشف لنا رسم الحقل هذا التشابه .

يمكن الآن أن نضع مفهوم الحقل على محك أصعب . وسنرى الآن إذا كان الحقل شيئاً آخر أكثر من تمثيل جديد للقوى الفاعلة . وفي الحقيقة يمكن إجراء المحاكمة التالية : لنفترض ، مؤقتاً ، أن الحقل يحوي وحده كل صفات الأفعال النابعة من منبعه . إن هذا مجرد تخمين . لكن صحته تعني أنه إذا كان للملف وللمغنطيس بالفعل حقل واحد فلابد عندئذٍ من أن يتصرفا كمغنطيسين حقيقيين ، فيتجاذبان ويتنافران حسب وضعهما النسبي كما يفعل المغنطيسان تماماً . ولابد أيضاً من أن يحدث ذلك ، وبالأسلوب نفسه ، بين ملف ومغنطيس . وبالاختصار إذا كان الحقل يتضمن



شكل (٤٦)

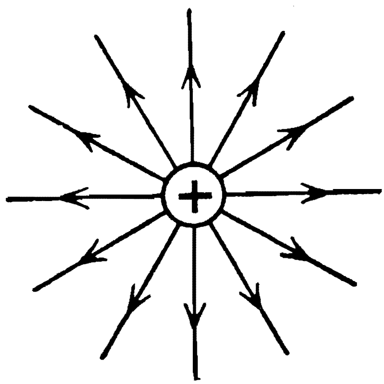
وحده كل مميزات منبعه فإن جميع الأفعـال المغنطيسيـة النـاجمة عن الملف يجب أن تتطابق مع ما يقابلها من الأفعال الناجمة عن القضيب المتمغنط ، لأن الحقل وحده مسؤول عن هذه الأفعال ، وهو وحده الذي يحتوي على كل خواصها . إن التجربة تؤكد هذا التخمين بما لايقبل الشك .

لقد كان صعباً علينـا إيجاد هذه الوقائع لولا مفهوم الحقل . ذلك أن صيغة العلاقة بين التيار الكهربائي والقطب المغنطيسي معقدة جداً . وفي حالة ملفين كان يجب أن نفحص القوى بين تيارين . لكننا عندما نفعل ذلك بواسطة الحقل نرى فوراً صفات كل هذه الأفعال عندما نرى الشبه بين حقل الملف وحقل المغنطيس .

وهكذا يحق لنا أن نرى في الحقل أهمية أكبر مما كان يبدو في البدء . فخواص الحقل وحدها تبـدو جوهرية في توصيف الظواهر ؛ ولا أهميـة للفروق بين منـابع الحقـل . وهكذا يتجلى النفع العظيم لمفهوم الحقل في واقع أنه يكشف عن وقائع تجريبية جديدة .

لقد بدا الحقل في البدء كشيء واقع بين المنبع والإبرة المغنطيسية ومفيد في توصيف القوة الفاعلة . وقد كنا نعتبره « وكيلاً » عن التيار الذي يفعل فعله بوساطته . لكن هذا الوكيل تحول إلى مترجم يترجم القوانين إلى لغة بسيطة وواضحة وأسهل فهماً .

إن هذا النجاح الأول للحقل يوحي بأن من الأسهل أن ندرس كل أفعال التيارات والمغانط والشحنات الكهربائية بصورة لامباشرة . أي بواسطة الحقل المترجم عنها . وهكذا يمكن أن نعتبر

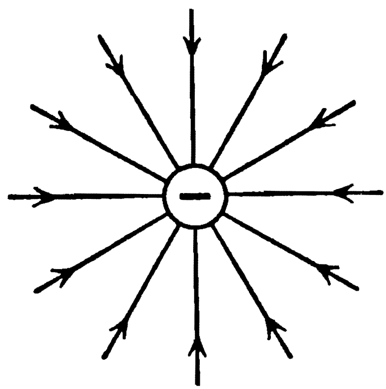


شكل (٤٧)

الحقل كائناً مرتبطاً بالتيار الكهربائي أي أنه موجود حتى في غياب القطب المغنطيسي الذي كان يكشف وجوده . لنحاول الآن استئناف السير على هذا الدرب الجديد .

إن الحقل المتولد عن ناقل مشحون بالكهرباء يمكن إدخاله بأسلوب مماثل لأسلوب اختراع حقل التثاقل وحقل التيار وحقل المغنطيس .

ونفحص الآن أبسط مثال على ذلك . إن توصيف الحقل الناتج عن كرة مشحونة إيجابياً يستلزم أن نتساءل عن أوصاف القوى الفاعلة في جسيم اختبار شحنته موجبة عندما نضعه في جوار منبع الحقل ، أي في جوار الكرة المشحونة . إن اختيار شحنة موجبة ، لاسالبة ، لجسيم الاختبار موضوع اصطلاح بحت كي نحدد اتجاهات الأسهم على خطوط القوى فقط . إن النموذج هنا يماثل نموذج حقل التثاقل في الشكل ٤٢ ، بسبب التشابه بين قانون كولون في الكهرباء وقانون نيوتن في التثاقل . والفرق الوحيد بين هذين النموذجين هو أن الأسهم هنا تعاكس في اتجاهها الأسهم هناك . ذلك لأن لدينا هنا التنافر بين شحنتين موجبتين ، بدلاً من التجاذب بين كتلتين ماديتين هناك . على أن الكرة لو كانت مشحونة سلبياً لكان النموذج هنا (وهو الشكل ٤٨) مطابقاً للنموذج هناك . لأن جسيم الاختبار المشحون إيجابياً سينجذب عندئذٍ نحو منبع الحقل .



شكل (٤٨)

إذا كان القطب الكهربائي والقطب المغنطيسي ساكنين فلا يتبادلان أي فعل : لاتجاذب ولاتنافر . وبالتعبير عن هذا الواقع نقول : إن الحقل الكهربائي الراكد لايؤثر في الحقل المغنطيسي

الراكد ، ولاهذا بذاك . وجملة« حقل راكد » تعني أن الحقل لايتغير أي شيء فيه بمرور الزمن . فالمغانط والشحنات يمكن أن تبقى متجاورة هكذا إلى أبد الآبدين إذا لم تزعجهما قوة خارجية عنهما . فالحقول الثلاثة ، الكهربائي الراكد والمغنطيسي الراكد والتثاقلي ، هي من طبائع مختلفة . إنها لاتتمازج : إن كلاً منها حريص على أنانيته ولايبدي أي اهتمام بالآخرين .

لنعد إلى الكرة المتكهربة التي ظلت حتى الآن في حالة سكون ولنفترض أنها أخذت تتحرك تحت تأثير قوة خارجية . إن قولنا : الكرة تتحرك ، يعني في لغة الحقل : إن حقل الشحنة الكهربائية يتغير مع الزمن . لكن الكرة المتكهربة المتحركة تعادل تياراً كهربائياً كما رأينا في تجربة رولاند (شكل ٣٢). ونحن نعلم أن كل تيار كهربائي مصحوب بحقل مغنطيسي . إن سلسلة محاكاتنا توجز كما يلي :

شحنة كهربائية متحركة ← تغيُّر حقل كهربائي .

↓

تياراً كهربائياً ← حقلاً مغنطيسياً مصاحباً .

وهكذا نصل إلى النتيجة التالية : **إن التغير في الحقل الكهربائي ، الناجم عن حركة شحنة ، مصحوب دوماً بحقل مغنطيسي .**

إن هذه النتيجة تستند على تجربة أرستيد (شكل ٣١) ، لكنها ظاهرة عامة تماماً . فهي تخبرنا أن الحقل الكهربائي ، عندما يكون متغيراً بمرور الزمن ، يكون مصحوباً دوماً بحقل مغنطيسي . وهذا قانون هام جداً في محاكاتنا القادمة .

طالما بقيت الشحنة ساكنة فلا يوجد سوى حقل كهربائي راكد . وبمجرد أن تبدأ بالحركة يتولد حقل مغنطيسي . ويمكن أن نقول أكثر من ذلك : **إن الحقل المغنطيسي ، المتولد عن حركة الشحنة الكهربائية ، يشتد كلما ازدادت سرعة حركة هذه الشحنة** . وهذا القانون هو الآخر نتيجة لتجربة أرستيد . وإذا أردنا أن نعبر عنه بلغة الحقل نقول : كلما كان تغير الحقل الكهربائي سريعاً يصبح الحقل المغنطيسي المصاحب شديداً .

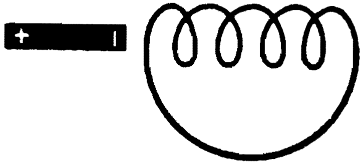
وبهذا الأسلوب نكون قد ترجمنا الوقائع المعروفة من لغة الموائع ، المستعملة في الصورة الميكانيكية القديمة ، إلى لغة الحقول . وسنرى في المستقبل عظم وضوح هذه اللغة الجديدة وفائدتها الجمة ومدى شموليا الواسع .

عمادا نظرية الحقل

« إن تغير الحقل الكهربائي مصحوب بحقل مغنطيسي » . إذا بادلنا بين كلمتي « مغنطيسي » و « كهربائي » يصبح هذا النص كما يلي : « إن تغير الحقل المغنطيسي مصحوب بحقل كهربائي » . إن التجربة وحدها قادرة على الحكم على هذا النص بنعم أو لا . لنلاحظ أن فكرة هذا النص مستوحاة من استخدام لغة الحقل .

لقد بنى فارادي ، قبل مئة وثلاثين عاماً ، تجربة أفضت إلى اكتشاف التيارات الكهربائية المتحرضة .

إن البرهان التجريبي على هذه التيارات أمر يسير . فلن نحتاج إلا إلى قضيب متمغنط (مغنطيس) وإلى ملف ، أو أية دارة سواه ، وإلى جهاز حساس يكشف ولادة تيار . نفرض في البدء أن يكون المغنطيس ساكناً وأن يكون في جواره ملف ساكن سلكه مغلق على نفسه بشكل دارة ، كما في الشكل ٤٩ . ولما كان لايوجد أي منبع كهربائي فلايمر في الملف أي تيار ؛ ولايوجد سوى الحقل المغنطيسي النابع من المغنطيس ؛ وهو حقل راكد ، أي لايتغير مع الزمن . لننقل الآن المغنطيس بسرعة من مكان لآخر ، إما بتقريبه من الملف أو بإبعاده عنه . نكتشف عندئذٍ أن تياراً كهربائياً يتولد فجأة ولبرهة قصيرة ثم يختفي . لنتلاعب بهذا التركيب كما نهوى فنلاحظ أنه أثناء حركة المغنطيس ، وأثناء الحركة فقط ، يتولد تيار في الملف يكشفه الجهاز الحساس (وهو غير مرسوم في الشكل) . لكن وجود التيار ــ بموجب نظرية الحقل ــ يدل ، لزوماً ، على وجود حقل كهربائي يجبر المائع الكهربائي على الحركة في السُلك . والتيار ، وكذلك بالتالي ، الحقل الكهربائي يتلاشيان عندما يتوقف المغنطيس عن الحركة من جديد . يطلق على هذا التيار اسم **التيار المتحرض** .

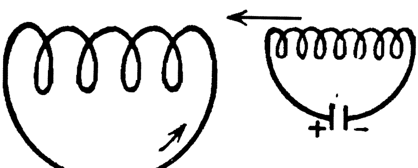


شكل (٤٩)

لنفترض مؤقتاً أننا لم نتعلم لغة الحقل وعلينا ، بالتالي ، أن نفسر هذه الظاهرة الجديدة ، كمياً وكيفياً ، في لغة المفاهيم الميكانيكية القديمة فنقول : إن حركة القطب المغنطيسي قد ولدت في سلك الملف قوة جديدة حركت المائع الكهربائي فيه . وهنا ينطرح سؤال آخر : بماذا تتعلق هذه القوة ؟ إن الإجابة عن هذا السؤال صعبة لأنها تتطلب فحص علاقة هذه القوة بسرعة حركة المغنطيس وبشكله وبشكل الدارة الكهربائية ؛ بالإضافة إلى أن تفسير هذه التجربة باللغة القديمة لايعطينا أي دليل لمعرفة فيما إذا كان التيار المتحرض يمكن أن يتولد عندما نستبدل بالمغنطيس دارة كهربائية أخرى يمر بها تيار قائم ونحركها كما حركنا المغنطيس .

لكن هذا الأمر سهل في لغة الحقل إذا وثقنا بمبدئنا القائل بأن الفعل يتعين كله بالحقل ، وعندئذٍ نرى ، دفعة واحدة ، أن الملف الذي يسري فيه التيار يقدم الخدمة نفسها التي يقدمها المغنطيس لأن حقلهما واحد كما رأينا ؛ فالشكل ٥٠ يمثل ملفين : ملفاً صغيراً يمر فيه تيار وملفاً أكبر ينشأ فيه التيار المتحرض . فإذا حركنا الملف الصغير ، كما كنا نحرك المغنطيس ، فلابد ، في وجهة نظر الحقل ، من أن يتولد تيار متحرض في الملف الكبير أثناء الحركة فقط . وهذا ما تؤيده التجربة فعلاً . ووجهة النظر هذه تشير إلى نتيجة أخرى هي : إذا لم نحرك أياً من الملفين واكتفينا ، في سبيل توليد حقل مغنطيسي متغير ، بقطع التيار في الملف الصغير ثم بإعادة إمراره فيه فلابد ، بموجب لغة الحقل ، من أن يمر تيار متحرض في الملف الكبير أثناء برهة القطع فقط ، ثم أثناء الإعادة . وهذا ما تؤيده التجربة أيضاً . وهكذا ندرك مدى قدرة نظرية الحقل على تفسير التجارب وعلى التنبؤ بتجارب جديدة سواءً بسواء .

لنأخذ مثالاً آخر . سلك مغلق دون أي منبع تيار وموجود في حقل مغنطيسي . فلا يهم ، بموجب نظرية الحقل ، أن يكون هذا الحقل نابعاً عن مغنطيس أو عن ملف ذي تيار . نوضح ، في الشكل ٥١ ، وضع السلك في الحقل المغنطيسي . فالوصف ، الكيفي والكمي ، للظواهر بسيط



شكل (٥٠)

جداً بلغة الحقل . إذ نرى على الرسم أن عدداً من خطوط الحقل تخترق السطح الداخلي المحدود بدائرة السلك ، ولاحاجة لأن نعتبر غير هذه الخطوط . ولايمر أي تيار في هذا السلك طالما لايتغير هذا الحقل ، ولو كان شديداً . لكن تياراً يتولد فيه بمجرد أن يتغير عدد خطوط الحقل التي تخترق السطح الداخلي فقط . وشدة هذا التيار تتعلق بسرعة تغير عدد هذه الخطوط ، تزايداً أو تناقصاً ، مهما كان سبب هذا التغير . إن هذا التغير وحده ، في عدد خطوط الحقل التي تخترق السطح الداخلي المحدود بدائرة السلك ، هو المفهوم الجوهري اللازم في التفسير ، الكمي والكيفي ، للتيار المتحرض . هذا وإن جملة « عدد الخطوط يتغير » تعني حتماً أن كثافتها تتغير ، وهذا يعني بدوره ، كما نعلم ، أن شدة الحقل تتغير .

إنها نقاط جوهرية في سلسلة المحاكمة : تغير الحقل المغنطيسي ← تياراً متحرضاً ← حركة الشحنة الكهربائية ← وجود حقل كهربائي .

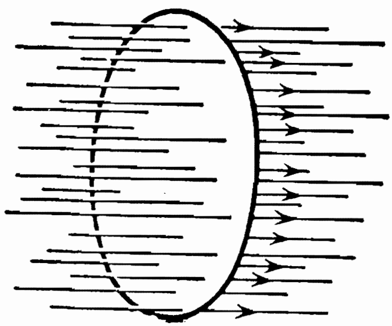
نقول إذن : **إن كل حقل مغنطيسي متغير مصحوب بحقل كهربائي** .

ونكون بذلك قد وجدنا العمادين الأساسيين لنظرية الحقلين ، الكهربائي والمغنطيسي . هذا هو الثاني . أما الأول فقد كان : **إن كل حقل كهربائي متغير مصحوب بحقل مغنطيسي** . وقد رأينا أحد مستنداته التجريبية المتمثل بتجربة أرستيد أو بتجربة رولاند .

ونوجز ذلك كله فيما يلي :

١ ـــ تغير الحقل الكهربائي ← حقل مغنطيسي ، بموجب تجربة أرستيد (شكل ٣٢) وسواها .

٢ ـــ تغير الحقل المغنطيسي ← حقل كهربائي ، بموجب تجربة فارادي (الشكلين ٤٩ و ٥٠) وسواها .



شكل (٥١)

هذا وإن الحقل الكهربائي ، المصاحب لتغير الحقل المغنطيسي ، يبدو كائناً واقعياً . فهو موجود سواء كانت الدارة التي تكشفه (في تجربة فارادي) بفضل تيارها المتحرض موجودة أم غير موجودة ، لأن فضل هذه الدارة ينحصر في كشفه ليس إلا . وقد كنا رأينا أيضاً أن الحقل المغنطيسي المصاحب لتغير الحقل الكهربائي هو كائن واقعي لأنه موجود سواء كانت الإبرة المغنطيسية التي تكشفه (في تجربة أرستيد) ، وبانحرافها عن منحاها الأولي ، موجودة أم غير موجودة ؛ لأن فضل هذه الإبرة ينحصر في كشفه ليس إلا .

الواقع أنه يمكن الاكتفاء بعماد واحد من هذين العمادين هو العماد الأول المستند إلى تجربة أرستيد . أما تجربة فارادي ، مستند العماد الثاني ، فيمكن استنتاجها من العماد الأول بوساطة قانون انحفاظ الطاقة ونحن لم نستخدم هذين العمادين معاً إلاّ لأسباب توضيحية واقتصادية .

ويجب أن نذكر نتيجة أخرى لنظرية الحقل . لدينا دارة يسري فيها تيار كهربائي نابع من بطارية فولتائية مثلاً . نقطع فجأة الاتصال بين سلك الدارة ومنبع التيار . فيتوقف التيار . لكن ظاهرة معقدة تبرز أثناء البرهة القصيرة التي يستغرقها انقطاع التيار . ونظرية الحقل قادرة على التنبؤ بهذه الظاهرة . فقبل انقطاع التيار كان يوجد حقل مغنطيسي حول السلك (تجربة أرستيد) ثم انتهى وجوده لحظة انقطاع التيار . فانقطاع التيار قد أعدم الحقل المغنطيسي . وهذا يعني أن خطوط الحقل ، التي كانت تخترق السطح المحدود بالسلك ، قد تغير عددها بسرعة كبيرة جداً . لكن أي تغير سريع ، مهما كان سببه ، لابد أن يولد تياراً متحرضاً . والمهم عملياً هنا هو أن السرعة العظيمة لهذا التغير تولد تياراً متحرضاً شديداً . وهذه النتيجة دليل آخر على صحة نظرية الحقل : إن الانقطاع المفاجىء للتيار لابد أن يكون مصحوباً بظهور مؤقت لتيار متحرض قوي . إن التجربة تثبت هذه النبوءة أيضاً . فأي إنسان جرب أن يقطع تياراً لابد أن يكون قد لاحظ ظهور شرارة عند نقطة القطع . إن هذه الشرارة تكشف عن تولد فرق كموني عظيم ناجم عن التغير السريع للحقل المغنطيسي .

إن هذه الظاهرة نفسها يمكن أن ينظر إليها من زاوية مختلفة . زاوية الطاقة . حقل مغنطيسي اختفى وشرارة ظهرت . الشرارة تمثل طاقة ، فتمثل الحقل المغنطيسي أيضاً . وعلى هذا فلدى استخدام لغة الحقل بمداها الكامل يجب علينا أن ننظر إلى الحقل المغنطيسي وكأنه مستودع طاقة وبهذه النظرة فقط نكون قادرين على فهم الظواهر الكهربائية والمغنطيسية بشكل ينسجم مع قانون انحفاظ الطاقة .

وهكذا وبعد أن كنا نتخذ الحقل نموذجاً نافعاً أخذ الحقل يفرض نفسه كحقيقة واقعة . فهو يســاعد على فهم الوقائع المعروفة ويقود إلى وقائع جديدة . وإن إعطاء طاقة للحقل هو خطوة إضـافية على طريق التقدم الذي اكتسب فيه مفهوم الحقل أهمية متزايدة ، وحيث بدأت مفاهيم الهيولات التي تلعب دوراً رئيسياً في الصورة الميكانيكية تنحسر شيئاً فشيئاً .

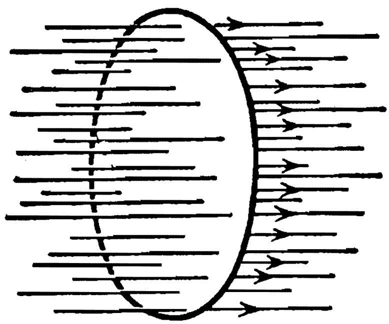
واقعيـة الـحقــل

إن التوصيف الكمي الرياضي لقوانين الحقل موجود بشكل مكثف فيما يسمى معادلات مكسويل . وقد أمكن صياغة هذه المعادلات بالانطلاق من الوقائع التي أتينا على شرحها ، لكن محتواها أكثر غنى بكثير مما ذكرناه . إن شكلها البسط يخفي عمقاً لانصل إليه إلا بدراسة واعية لها . فهي تشكل ، في الفيزياء ، أهم حدث منذ عصر نيوتن ، لابسبب غنى محتواها فحسب بل ولأنها نموذج لشكل جديد من القوانين .

إن السمات المميـزة لمعـادلات مكسـويل ، والتي بدأت تدخل في كل معـادلات الفيزياء الحديثة ، توجز في نص واحد : إن معادلات مكسويل هي قوانين تمثل بنية الحقل .

لماذا تختلف معادلات مكسويل ، بشكلها وصفتها ، عن معادلات الميكانيك التقليدي ؟ ماذا يعني قولنا إنها تصف بنية الحقل ؟ كيف نصوغ ، بالاستناد إلى نتائج تجربتي أرستيد وفارادي ، نوعاً جديداً من القوانين ذا أهمية كبيرة في التطور اللاحق في الفيزياء ؟

لقد رأينـا ، من خلال تجربة أرستيد ، كيف يلتف الحقل المغنطيسي من تلقاء ذاته حول الحقل الكهربائي المتغير مع الزمن . ورأينا ، من خلال تجربة فارادي ، كيف يلتف الحقل الكهربائي من تلقاء ذاته حول الحقل المغنطيسي المتغير مع الزمن . فلإعطاء فكرة عن بعض السمات المميزة لنظرية مكسويل نكتفي في الوقت الحاضر بتركيز الانتباه على واحدة من هاتين التجربتين . ولأجل ذلك نرسم مرة أخرى (في الشكل ٥٢) مخطط الدارة التي يسري فيها تيار متحرض بحقل مغنطيسي



شكل (٥٢)

متغير . فنحن نعلم أن التيار المتحرض يتولد عندما يتغير عدد خطوط الحقل التي تخترق السطح الداخلي المحدود بسلك الدارة ، **مهما كان سبب هذا التغير** . وعلى هذا يجب أن نتوقع نشوء التيار المتحرض ، لامن تغير عدد هذه الخطوط بمعناه الحرفي فحسب (أي لامن تغير كثافتها بتغير شدة الحقل فحسب) بل وعندما يتغير شكل الدارة بحيث تتزايد مساحتها أو تتناقص ، أو عندما تتحرك هذه الدارة بحيث تأخذ وضعاً مائلاً بالنسبة لمنحى خطوط الحقل ، مما يؤدي إلى تغير عدد الخطوط التي تخترق هذه المساحة . فيجب إذن الإلحاح على أن سبب هذا التغير لايهم إطلاقاً . وهذا ما تؤكده التجربة بشكل حاسم . لكن أخذ كل هذه الإمكانيات المتنوعة بعين الاعتبار ومناقشة آثارها الخاصة أمر يقودنا إلى نظرية شديدة التعقيد . ولكن ألا يمكن أن نبسِّط هذه المسألة ؟ لنحاول أن نتخلى ، في اعتباراتنا ، عن كل ما يتعلق بشكل الدارة وبطولها وبميلها وبمساحة دائرتها . ولأجل ذلك نتصور ، في الشكل ٥٢ ، أن الدارة تتقلص بالتدريج حتى تصبح دارة صغيرة جداً لدرجة أنها لاتعود تضم سوى نقطة واحدة من الفراغ . فعندئذٍ يصبح كل ما يخص شكلها ومساحتها وميلها غير ذي أهمية ، فيمكن أن نضرب صفحاً عنه . وعندئذٍ نحصل على قوانين تربط ما بين تغيرات الحقل المغنطيسي والحقل الكهربائي المتولد عنها في أية نقطة من الفراغ وفي أية لحظة .

إن هذه العملية هي إحدى الخطوات الرئيسية على طريق الحصول على معادلات مكسويل ، وهي أيضاً تجربة مثالية يقوم بها الخيال فيكرر بها تجربة فارادي عندما تصبح الدارة نقطة من الفضاء .

الواقع أننا يجب أن نعتبرها نصف خطوة لا خطوة كاملة . فنحن ، حتى الآن ، قد ركزنا انتباهنا على تجربة فارادي . لأن العماد الآخر لنظرية الحقل ، المستند إلى تجربة أرستيد ، يجب أيضاً أن يفحص بالعناية ذاتها وبالأسلوب ذاته . ففي هذه التجربة تلتف خطوط القوة المغنطيسية من تلقاء ذاتها حول دارة التيار الكهربائي . فإذا تقلصت هذه الدارة ، هي أيضاً ، حتى تصبح نقطة في الفضاء يصبح بإمكاننا الحصول على قانون يربط ما بين تغيرات الحقل الكهربائي والحقل المغنطيسي المتولد عنها في أية نقطة من الفراغ وفي أية لحظة . وبذلك نكون قد خطونا النصف الآخر وتمت الخطوة بكاملها .

وعلينا أيضاً أن نخطو خطوة أخرى . ففي رأي فارادي لابد من سلك لكشف وجود الحقل الكهربائي ، كما لابد من قطب مغنطيسي لكشف وجود الحقل المغنطيسي . لكن فكرة مكسويل النظرية تذهب إلى أبعد من هذه الوقائع التجريبية . فالحقل الكهربائي والمغنطيسي أو ، بكلمة واحدة ، **الكهرطيسي** هو في رأي مكسويل كائن حقيقي . فالحقل الكهربائي يتولد من

حقل مغنطيسي متغير سواءً كان السلك الذي يكشف وجوده موجوداً أم غير موجود ؛ والحقل المغنطيسي يتولد من حقل كهربائي متغير سواء كان القطب المغنطيسي الذي يكشف وجوده موجوداً أم غير موجود .

وهكذا تم الوصول إلى معادلات مكسويل بخطوتين أساسيتين : تقود أولاهما إلى تقليص خط الحقل المغنطيسي الدائري الذي يلف حول الحقل الكهربائي المتغير (في تجربتي أرستيد ورولاند كما في الشكل ٤٤) إلى أن يصبح نقطة في الفراغ ، وإلى تقليص خط الحقل الكهربائي الدائري الذي يلف حول الحق المغنطيسي المتغير (في تجربة فارادي) إلى أن يصبح نقطة في الفراغ . وتتلخص بأن نعتبر الحقل الكهرطيسي شيئاً واقعياً يفعل ويتغير وفق معادلات مكسويل .

إن معادلات مكسويل تعين بنية الحقل الكهرطيسي . فكل الفضاء مسرح عمل هذه القوانين وليس فقط ، كما كانت الحال في قوانين الميكانيك ، النقاط التي توجد فيها مادة وشحنات .

لنتذكر كيف تجري الأمور في الميكانيك . فبمعرفة مكان الجسم وسرعته في لحظة معينة وبمعرفة القوى الفاعلة يصبح بالإمكان تحديد كل مساره المستقبلي . أما في نظرية مكسويل فمعرفة الحقل الكهرطيسي في لحظة معينة يمكن أن تقود ، بموجب معادلات النظرية ، إلى معرفة كيفية تغير الحقل في المكان وفي الزمان . أي أن معادلات مكسويل تتيح لنا أن نتبع قصةالحقل ، كما كانت معادلات الميكانيك تتيح اتباع قصة الجسيمات المادية .

على أن ثمة فرقاً جوهرياً بين قوانين الميكانيك وقوانين مكسويل . ومقارنة قوانين نيوتن في التثاقل بمعادلات مكسويل في الحقل الكهرطيسي تلقي ضوءاً على بعض السمات المميزة لهذه المعادلات .

فبواسطة قوانين نيوتن يمكن أن نستنتج ، من القوة التي تفعل بين الشمس والأرض ، حركة الأرض . فهذه القوانين تربط حركة الأرض بفعل الشمس البعيدة ، أي أن الأرض والشمس ، برغم المسافة بينهما ، فاعلتان كلاهما في مسرح القوى .

أما في نظرية مكسويل فلايوجد فاعل مادي ، لأن معادلاتها الرياضية تعبر عن قوانين تتحكم في الحقل الكهرطيسي ، وهي لاتربط ، بعكس قوانين نيوتن ، فيما بين كائنات بينها مسافات كبيرة ؛ فهي إذن لاتعلق الحوادث **هنا** بالظروف **هناك** ؛ بل إن الحقل **هنا** يتعلق **الآن** بالحقل في **الجوار القريب جداً** وفي لحظة سابقة **ببرهة قصيرة جداً** . فهي تتيح التنبؤ بما سيحدث في نقطة أبعد بقليل وفي اللحظة التالية عندما نعلم ما يحدث هنا وفي اللحظة الحاضرة ، فتسمح لنا إذن

بزيادة معلوماتنا عن الحقل خطوة صغيرة بعد خطوة صغيرة ؛ وهكذا دواليك ، نقطة بعد نقطة ولحظة بعد لحظة ، نعلم ما يحدث في النقاط البعيدة . أما في نظرية نيوتن فالخطوات الواسعة فقط هي التي تسمح لنا بأن نربط فيما بين الظواهر المتباعدة . كما أن نظرية مكسويل تسمح بإيجاد نتائج تجربتي أرستيد وفارادي ولكن فقط بتجميع الخطوات الصغيرة التي تتحكم في كل منها معادلات مكسويل .

هذا وإن الدراسة الرياضية العميقة لمعادلات مكسويل تدل على إمكانية استخلاص نتائج جديدة وغير متوقعة ، وإن النظرية كلها يمكن أن توضع على محك أقسى ، لأن نتائجها النظرية ذات سمة كمية ، وهي مستمدة من خلال سلسلة من الأدلة المنطقية .

لنتصورتجربة مثالية أخرى : كرة صغيرة مشحونة بالكهرباء تجبرها قوة خارجية على النوسان بسرعة كبيرة وبإيقاع ثابت كالنواس . فكيف يمكن أن نشرح ، بلغة الحقل وبما اكتسبناه من معلومات عن تغيرات الحقل ، كل ما يحدث هنا ؟

إن نوسان الشحنة يولد حقلاً كهربائياً متغيراً مصحوباً دوماً بحقل مغنطيسي متغير . فإذا وضعنا في الجوار سلكاً يشكل دارة مغلقة فإن الحقل المغنطيسي المتغير سيكون عندئذٍ مصحوباً بتيار كهربائي متحرض في الدارة . إن كل هذا ليس سوى وقائع معروفة ؛ لكن دراسة معادلات مكسويل تسمح لنا بأن نتوغل إلى أعماق مسألة الشحنة الكهربائية المهتزة . فبالاستنطاق الرياضي لمعادلات مكسويل يمكن أن نكتشف صفات الحقل المحيط بالشحنة المهتزة : بنيته قرب الشحنة المنبع وبعيداً عنه ، وتغيراته بمرور الزمن . يطلق على نتيجة هذا الاستكشاف اسم **الموجة الكهرطيسية** . فالشحنة المهتزة تصدر طاقة إشعاعية تنتشر في الفضاء بسرعة معينة ؛ لكن انتشار الطاقة وحركة الحالة هما صفتان مميزتان من صفات كل الظواهر الموجية .

لقد رأينا أنه يوجد أنواع شتى من الأمواج . فهناك الأمواج الطولانية النابعة عن كرة نابضة ، وهي موجة تحمل تغيرات الكثافة عبر الوسط . وهناك الأوساط التي تشبه الهلام والتي تنقل أمواجاً عرضانية ، فالتشوه النائس الذي يصيب الهلام ، نتيجة الدوران النائس للكرة ، ينتشر عبر الوسط . فما هي طبيعة التغيرات التي تحملها الموجة الكهرطيسية ؟ إنها بالضبط تغيرات الحقل الكهرطيسي . فكل تغير للحقل الكهربائي يولد حقلاً مغنطيسياً متغيراً . وكل تغير في هذا ..، وهكذا دواليك . ولما كان الحقل يمثل طاقة فإن كل هذه التغيرات ، التي تنتشر في الفضاء بسرعة معينة ، تشكل موجة . ويدل الاستنطاق الرياضي للنظرية على أن خطوط الحقلين ، الكهربائي

والمغنطيسي ، تقع كلها في مستويات عمودية على منحى انتشار الموجة . فالموجة الكهرطيسية هي إذن موجة عرضانية . وهكذا نرى بوضوح أن الملامح الأصلية لصورة الحقل ، المستمدة من تجربتي أرستيد وفارادي ، ما تزال قائمة ؛ ولكننا ندرك أن لها معنى عميقاً .

إن الموجة الكهرطيسية تنتشر في الفضاء الخالي ، وهذا أيضاً نتيجة لنظرية الحقل . ولو توقفت الكرة المهتزة عن الحركة فجأة فإن الحقل في جوارها المباشر يصبح كهربائياً راكداً . لكن سلسلة الأمواج ، التي كان الاهتزاز قد ولدها ، تستمر في الانتشار . فالأمواج تحيا وجوداً مستقلاً بذاتها ويمكن أن نتتبع قصة أي شيء مادي .

وهنا نشعر تماماً بأن صورة كهرطيسية ، منتشرة في الفراغ بسرعة معينة ، تطيع معادلات مكسويل ، فقط لأن هذه المعادلات تحتوي بنية الحقل الكهراطيسي في أية نقطة من الفراغ وفي أية لحظة نريد .

إن سؤالاً آخر ينطرح الآن : بأية سرعة تنتشر الموجة الكهرطيسية في الخلاء . إن النظرية ، بالاعتماد على بعض وقائع تجريبية بسيطة لا علاقة لها بالسرعة الحقيقية للأمواج ، تعطي جواباً واضحاً : **إن سرعة الموجة الكهرطيسية في الخلاء تساوي سرعة النور فيه** .

وبنتيجة ذلك كله نقول : إن تجربتي أرستيد وفارادي هما أساس قوانين مكسويل . وكل النتائج التي توصلنا إليها حتى الآن مستمدة من هذه القوانين معبراً عنها بلغة الحقل . لكن الاكتشاف النظري أعظم الانجازات في تاريخ العلم .

لقد أيدت التجارب نبوءات النظرية . فمنذ مئة عام وللمرة الأولى أثبت هرتز في مخبره وجود الأمواج الكهرطيسية وانتشارها بسرعة تساوي سرعة الضوء . واليوم يشهد ملايين الناس إرسال الأمواج الكهرطيسية واستقبالها . ولئن كانت الأجهزة المستعملة اليوم أكثر تعقيداً بكثير من تلك التي بناها هرتز ، فما ذلك إلا بهدف التقاط هذه الأمواج الإذاعية على بعد آلاف الكيلومترات من محطة إرسالها ، بدلاً من بضعة أمتار في تجارب هرتز .

الحقل والأثير

إن الموجة الكهرطيسية،موجة عرضانية وتنتشر في الفضاء الخالي بسرعة انتشار النور فيه . إن هذه الوقائع توحي بوجود صلة قربى وثيقة بين الظواهر الضوئية والظواهر الكهرطيسية .

عندما كنا أمام مسألة الاختيار بين النظرية الحبيبية ، في طبيعة النور ، والنظرية الموجية قررنا

أن نختار النظرية الموجية . ولقد كان انعراج الضوء أقوى الأدلة في اتخاذ هذا القرار . لكننا لن ندخل في تناقض مع أي من التفاسير في الوقائع الضوئية لو افترضنا أيضاً أن **موجة الضوء هي موجة كهرطيسية** . بل إننا ، على العكس ، قد نتمكن من استخلاص نتائج أخرى ؛ فلو كان الأمر فعلاً كما نقول فلابد من أن نجد رابطة بين الخواص الضوئية للمادة وبين خواصها الكهربائية كما تتولد من نظرية مكسويل . هذا واقع أننا نستطيع فعلاً استنباط نتائج من هذا القبيل ، وأن تنجح هذه النتائج في الامتحان التجريبي ، لهو الحجة الرئيسية في صالح النظرية الكهرطيسية للضوء .

إن هذه النتيجة العظيمة ناجمة عن نظرية الحقل . وتتلخص بأن فرعين من العلم ، لم تكن بينهما في الظاهر أية رابطة ، ينضويان الآن في نظرية واحدة . فمعادلات مكسويل تفسر التحريض الكهرطيسي كما تفسر إنكار الضوء على حد سواء . فإن كان العلم يهدف إلى تفسير كل ما يحدث أو ما يمكن أن يحدث بنظرية واحدة فلاريب أن انصهار الضوء والكهرباء في بوتقة واحدة لخطوة عظيمة على هذا الطريق . والفرق الفيزيائي الوحيد بين الموجة الكهرطيسية العادية وبين الموجة الضوئية يكمن في طول الموجة ؛ فأمواج الضوء ذات أطوال قصيرة جداً ، وهذا ما يجعلها مرئية بالعين فيمنحها اسم النور ، بينما الأمواج الكهرطيسية العادية ذات أطوال موجية أكبر بكثير ولايكشفها سوى جهاز الراديو .

كانت النظرية الميكانيكية تسعى إلى إرجاع كل ظواهر الطبيعة إلى قوى متبادلة بين جسيمات مادية . وهذا الرأي كان أساساً للنظرية الساذجة في المائعين الكهربائيين . ولم يكن للحقل الكهربائي وجود لدى فيزيائيي أوائل القرن التاسع عشر . فكانوا يجتهدون في تفسير الفعل المتبادل بين الشحنات الكهربائية ، حصراً ، بواسطة مفاهيم تخص الشحنات ذاتها .

وعندما نشأ مفهوم الحقل لم يكن ، في البدء ، سوى وسيلة لتسهيل فهم الظواهر في وجهة نظر ميكانيكية . أما في لغة الحقل الجديدة فإن خواص الحقل ذاته بين الشحنتين ، وليس الشحنتين بالذات ، هي الأساس الجوهري لفهم فعلهما . هذا وإن الاعتراف بفضل هذه المفاهيم الجديدة قد اتسع شيئاً فشيئاً حتى أزاح الهيولة . وقد ساد شعور واضح بأن حدثاً عظيم الأهمية قد طرأ على علم الفيزياء . فقد وُلد واقع جديد ومفهوم جديد لم يكن لهما محل في الصورة الميكانيكية . وبالتدريج وبعد كفاح مستمر توصل مفهوم الحقل إلى احتلال المحل الأول في الفيزياء وأصبح يُعد من المفاهيم الأساسية في هذا العلم . إن الحقل الكهرطيسي ، عند الفيزيائي الحديث ، واقع لاتقل حقيقته عن حقيقة الكرسي الذي يجلس عليه .

على أن من الخطأ الظن أن هذه الرؤية الجديدة قد خلصت العلم من عيوب نظرية المائعين الكهربائيين القديمة أو أن النظرية الجديدة قد أبطلت مكتسبات القديمة . لكنها وإن كانت تحتفظ

بمزايا ومحدودية القديمة إلا أنها أتاحت النظر لرؤية المفاهيم القديمة من قمة أعلى . وهذا الحكم صحيح ليس فقط في نظرية المائعين الكهربائيين ونظرية الحقل بل في كل التغيرات التي تطرأ على النظريات الفيزيائية مهما بدت ثورية . ففي حالتنا الراهنة ما يزال مفهوم الشحنة قائماً في نظرية مكسويل رغم أن الشحنة أصبحت فيها مجرد منبع للحقل الكهربائي . فقانون كولون ما يزال صحيحاً وهو موجود في معادلات مكسويل حيث يمكن استخلاصه كإحدى نتائجها العديدة . وبإمكاننا دوماً تطبيق النظرية القديمة في كل مجال يمكن أن تنطبق فيه . لكن لنا الحق أيضاً في تطبيق النظرية الجديدة لأن كل الوقائع المعروفة تقع في مجال صحتها .

وإذا رغبنا في استخدام تشبيه أمكن أن نقول : إن تولد نظرية جديدة لايشبه هدم كوخ في سبيل بناء ناطحة سحاب في مكانه . لكنه يشبه بالأحرى ارتقاء جبل نشرف من سفحه على مناظر متجددة وأكثر فأكثر اتساعاً ، مما يتيح كشف روابط غير متوقعة بين نقطة الانطلاق والمناطق العديدة التي حولها . لكن نقطة الانطلاق ما تزال موجودة ويمكن أن نراها بالرغم من أنها تبدو أصغر وأقل شأناً في المنظر الواسع الذي أصبحنا نشاهده بفضل التغلب على العقبات التي صادفناها أثناء الصعود .

ولقد مضى في الحقيقة زمن طويل قبل أن يشعر الفيزيائيون بغنى محتوى نظرية مكسويل . فالحقل كان ، في البدء ، شيئاً يؤمل تفسيره فيما بعد ميكانيكياً بواسطة الأثير . وعندما ظهر أن هذا البرنامج لايمكن تنفيذه أصبحت مكتسبات نظرية الحقل أعظم وأهم من أن يُضحى بها على مذبح الميكانيك . كما أن مسألة تصور نموذج ميكانيكي للأثير قد تضاءل الاهتمام بها لأن نتيجتها كانت تدفع إلى يأس متزايد بسبب السمة القسرية والمصطنعة التي تشوب الافتراضات .

إن أفضل مخرج من هذه الورطة هو أن نقبل بواقع أن نقل الأمواج الكهرطيسية هو خاصة فيزيائية من خصائص الخلاء ، دون أن نهتم كثيراً بمعنى هذا القول . وهذا لايمنع من استعمال كلمة « أثير » ، ولكن فقط عندما نريد أن نعبر عن خاصة فيزيائية للفضاء . إن هذه الكلمة قد تغير معناها عدة مرات خلال تطور العلم . وهو اليوم لايمثل وسطاً مؤلفاً من جسيمات . إن قصته بعيدة عن نهايتها ، وتستمر من خلال نظرية النسبية .

جملة المقارنة (المرجع)

وبعد أن وصلنا إلى هذه المرحلة من قصتنا يجب علينا أن نعود إلى نقطة البدء ، أي إلى قانون غاليله في العطالة . فنسوق قوله مرة أخرى .

إن كل جسم يحافظ على حالة سكونه أو على حالة حركة منتظمة في خط مستقيم ما لم تجبره على تغيير هذه الحالة قوة تؤثر فيه .

وعندما نفهم فكرة العطالة نعجب أنه يمكن إضافة شيء جديد بخصوصها . وبالرغم من أننا ناقشنا هذه المسألة في أعماقها فإن الموضوع لم ينته بعد .

لنتصور فيزيائياً مؤمناً بأن قانون العطالة يمكن أن يوضع على محك التجارب الواقعية فتقبله أو ترفضه . فيدفع كرة ملساء على أرض أفقية ملساء بحيث يحاول حذف أي احتكاك قدر الإمكان . فيلاحظ أنه كلما كانت الأرض والطاولة أملس فأملس كانت الحركة أنظم فأنظم . وفي الوقت الذي يتهيأ فيه ليلفظ مبدأ العطالة يتدخل إنسان ليمزح معه . الفيزيائي يعمل في غرفة ليس لها نوافذ وليس لها أي اتصال بالعالم الخارجي . يصنع الإنسان المازح آلة تمكنه من جعل الغرفة بكاملها تقوم بحركة دورانية حول محور شاقولي يمر بمركز الغرفة . بمجرد أن تأخذ الغرفة بالدوران يشاهد الفيزيائي أشياء جديدة غير متوقعة . ذلك أن الكرة ، التي كانت تتحرك بانتظام ، تحاول الابتعاد عن المركز وتقترب ما أمكنها من جدران الغرفة . ثم إنه هو نفسه يشعر بقوة غريبة تشده نحو الجدار . فهو يعاني الإحساس الذي يعانيه أي مسافر في قطار أو سيارة كانت تسير في خط مستقيم بسرعة ثابتة كبيرة ثم صادفت منعطفاً حاداً ، أو الإحساس الذي يعانيه رجل في أرجوحة دوارة . سيرى الفيزيائي أن كل النتائج التي كان يلاحظها تذهب أدراج الريّاح .

إن هذا الفيزيائي سيرى نفسه مضطراً ، لا لأن ينبذ مبدأ العطالة فحسب ، بل وكل قوانين الميكانيك . لقد كان قانون العطالة نقطة انطلاقه ؛ فإذا فسد هذا القانون فإن كل النتائج التي استخلصها منه تصبح باطلة ؛ فالراصد الذي يقضي كل حياته في غرفة دوارة سيتوصل إلى قوانين ميكانيكية تختلف عن قوانيننا . لكنه لو دخل الغرفة مسلحاً بمعارف عميقة وبيقين راسخ في مبادىء الفيزياء فسيفسر الانهيار الظاهري لقوانين الميكانيك بافتراض أن الغرفة تدور ؛ وسيمكنه بواسطة تجارب جديدة أخرى أن يعرف كيف تدور .

لماذا يجب أن نعلق كل هذه الأهمية على الراصد الموجود في الغرفة الدوارة ؟ إن السبب بسيط ، وهو أننا ، إلى حد ما ، في الوضع ذاته على كرتنا الأرضية . فنحن نعلم ، منذ كوبرنيق ، أن الأرض تدور حول محورها وتدور حول الشمس . إن هذه الفكرة ، ببساطتها ووضوحها لدى كل الناس ، لم تخف على تقدم العلم . لندع هذا الموضوع ، مؤقتاً ، ولنقبل بوجهة نظر كوبرنيق . إذا كان راصدنا الدائر مع الغرفة لايستطيع أن يؤكد قوانين الميكانيك فلابد أن نكون جميعاً ، على

سطح أرضنا ، غير قادرين على ذلك . لكن دوران الأرض بطيء نسبياً ، وهذا يجعل مفعول الدوران ضعيف الأثر . لكنه يوجد تجارب عديدة يظهر فيها انحراف طفيف عن قوانين الميكانيك ؛ لكن تفسير هذا الانحراف بواسطة هذه القوانين ذاتها يمكن أن يتخذ دليلاً على دوران الأرض .

لكننا وبكل أسف لانستطيع أن نضع أنفسنا في مكان بين الأرض والشمس ، كي نثبت الصحة الدقيقة لقانون العطالة ونرصد حركة الأرض . ولايمكن أن نفعل هذا إلا بالفكر ؛ لأننا مضطرون لإجراء تجاربنا على الأرض حيث نعيش . ويعبر الفيزيائيون عن واقع هذا الاضطرار بالنص العلمي : **إن الأرض هي جملة الإحداثيات عندنا** .

ولإلقاء الضوء على معنى هذه الجملة نتخذ مثالاً بسيطاً . فنحن يمكن أن نتنبأ بالمكان الذي سيصل إليه ، في لحظة معينة لاحقة ، حجر ترك يسقط حراً من قمة البرج ، وأن نتأكد من هذه النبوءة بالتجربة ، فنضع مسطرة موازية لخط السقوط ونتنبأ بالرقم الذي سيكون الجسم بحذائه لحظة الرصد . ومن الواضح أن البرج والمسطرة ليسا مصنوعين من مادة يمكن أن يطرأ عليها أي تغيير أثناء التجربة . فكل ما يلزمنا ، في هذه التجربة ، وجود مسطرة متينة وميقاتية مثالية لايمكن بدونهما التحقق من قانون غاليله في سقوط الأجسام . فبهاتين الأداتين الفيزيائيتين البسيطتين يمكن أن نؤكد هذا القانون بدرجة ما من الصحة . إن إجراء هذه التجربة بعناية قد دل على وجود خلاف بينها وبين النظرية ناجم عن دوران الأرض أي ، بتعبير آخر ، عن واقع أن قوانين الميكانيك ، كما هي مصوغة هنا ، ليست كاملة الصحة في جملة إحداثيات مربوطة ربطاً محكماً بالكرة الأرضية (سنقول اختصاراً : مربوطة بالأرض) .

في كل التجارب الميكانيكية ، مهما كان نوعها ، يكون الهدف تعيين أوضاع نقاط مادية في لحظة زمنية معينة ، كما هي الحال تماماً في تجربة الجسم الساقط من البرج . لكن الوضع يجب أن ينسب دوماً إلى شيء ما ؛ بالنسبة للبرج أو بالنسبة للمسطرة في التجربة المذكورة مثلاً .

فلكي نستطيع أن نعين أمكنة الأجسام لابد من اعتماد شيء نسميه **جملة بالمقارنة** . فلتعيين أمكنة الأشياء والناس في مدينة ما ، نستخدم أسماء الشوارع التي تشكل جملة المقارنة التي تنتسب إليها أرقام البيوت . ونحن حتى الآن لم نهتم ، عند الكلام عن قوانين الميكانيك ، بذكر أية جملة مقارنة لأننا ، ونحن نحيا على الأرض ، لانجد أية صعوبة في اعتماد جملة مقارنة مربوطة بالأرض في أية تجربة نريد . وهذه الجملة المؤلفة من قضبان مدرَّجة صلبة ثابتة ننسب إليها كل نتائج الرصد ، تسمى **جملة إحداثيات** أو **جملة مقارنة أو مرجعاً** . أما نحن فنستعمل الكلمة الواحدة : مرجع .

إن كل أقوالنا عن الظواهر الفيزيائية مشوبة ، حتى الآن ، بثغرة صغيرة . فنحن لم نأخذ بعين الاعتبار واقع أن الملاحظات الرصدية (وسنقول عمليات الرصد) يجب أن تتم كلها بالنسبة لمرجع معين ، وبدلاً من أن نعين هذا المرجع بدقة كنا نتجاهل وجوده . فعندما كنا نقول مثلاً : « إن الجسم يتحرك بانتظام .. » كان علينا في الواقع أن نقول : « إن الجسم يتحرك بانتظام بالنسبة للمرجع الذي .. » . ولقد علمتنا تجربة الغرفة الدوارة أن نتائج التجربة الفيزيائية الواحدة قد تختلف باختلاف المرجع الذي نرصد التجربة منه .

فإذا كنا إزاء مرجعين يدور أحدهما بالنسبة للآخر فإن قوانين الميكانيك لايمكن أن تكون صحيحة في كلا المرجعين معاً . فإذا كان سطح الماء في بركة أفقياً واتخذنا هذا السطح مرجعاً أولاً فإن سطح البركة المماثلة المربوطة بالمرجع الآخر الدوار لن يكون أفقياً لأنه يتخذ شكلاً معروفاً لدى كل من جرب أن يحرك القهوة بالملعقة في فنجانها .

فعندما صغنا قوانين الميكانيك الرئيسية أهملنا نقطة هامة ، وهي أننا لم نذكر المرجع الذي تكون فيه هذه القوانين صحيحة . فكل علم الميكانيك يبقى ، لهذا السبب ، معلقاً في الهواء لأننا لانعلم المرجع الذي يُنسب إليه هذا العلم . ومع ذلك نغض ، في الوقت الحاضر ، النظر عن هذا النقص . وسنفترض ، رغم أن هذا الافتراض ليس صحيحاً بالضبط ، أن قوانين الميكانيك صحيحة في كل مرجع مرتبط بالأرض . ونحن إنما نقبل هذا الافتراض لأنه قريب جداً من الواقع ، ولكي نعتمد على مرجع معين يتدارك ذلك النقص في أقوالنا .

وهكذا نفترض وجود مرجع تكون فيه قوانين الميكانيك صالحة . فهل هو المرجع الوحيد ؟ لنتصور مرجعاً آخر ، قطاراً أو سفينة أو طائرة ، متحركاً بالنسبة للأرض . هل ستكون قوانين الميكانيك صالحة الاستعمال في هذا المرجع ؟ نعلم يقيناً أنها ليست صالحة دوماً ، فهي تفسد مثلاً عندما يسير القطار مسرعاً في منعطف ، وعندما تتأرجح السفينة بلطم النوء العاصف ، وعندما تنقض الطائرة هاوية . لنبدأ بمثال بسيط : مرجع يتحرك مستقيماً بانتظام بالنسبة لمرجعنا « الصالح » أي بالنسبة للمرجع الذي تكون فيه قوانين الميكانيك صالحة ، كقطار مثالي أو كسفينة تنساب في خط مستقيم وفي بحر هادىء ممتع دون أن تغير سرعتها أبداً . إننا نعلم بالخبرة أن هذين المرجعين ، القطار والسفينة ، « صالحان » : أي أن التجارب التي قد نجريها في قطار أو في سفينة متحركين بانتظام ستعطي نتائج لاتختلف البتة عن نتائج التجارب نفسها عندما نجريها في المخبر على سطح الأرض . لكن إذا توقف القطار فجأة ، أو تسارع تسارعاً شديداً فجأة أو هاج البحر ، فإن أموراً

غريبة تحدث . تقفز الحقائب من رفوفها على رؤوس المسافرين في القطار وتضطرب الطاولات والكراسي في السفينة ويصاب الركاب بدوار البحر . وهذا يعني بلغة الفيزياء أن قوانين الميكانيك لم تعد تنطبق على هذه المراجع ، أي أنها مراجع « سيئة » .

يعبر الفيزيائي عن هذه النتائج بما يسميه **مبدأ النسبية الغاليلي** : **إذا كانت قوانين الميكانيك صحيحة في مرجع ما ، فإنها حتماً صحيحة في أي مرجع متحرك بالنسبة له حركة مستقيمة منتظمة** .

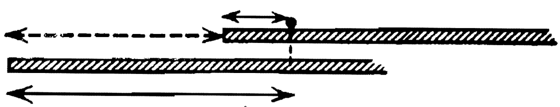
فإذا كنا إزاء مرجعين لايتحرك أحدهما بالنسبة للآخر حركة منتظمة فإن قوانين الميكانيك لايمكن أن تكون صحيحة في كليهما معاً . ويطلق عادة على كل مرجع « صالح » أي كل مرجع يكون فيها مبدأ العطالة صحيحاً ، وبالتالي كل قوانين الميكانيك صحيحة ، اسم **مرجع عطالي** . إن مسألة وجود ، أو عدم وجود ، مرجع عطالي في الطبيعة ما تزال مطروحة ، ولكن إذا وجد مرجع عطالي واحد فيوجد عدد لانهائي من أمثاله ، ذلك أن أي مرجع يتحرك حركة مستقيمة منتظمة ، بالنسبة لمرجع عطالي ، هو مرجع عطالي أيضاً .

لنتأمل حالة مرجعين ينطلقان من نقطة معينة ويتحركان بانتظام ، أحدهما بالنسبة للآخر ، بسرعة معينة . ومن يحب الصور الملموسة أن يتصور قطاراً ، أو سفينة ، متحركاً بالنسبة للأرض . إن قوانين الميكانيك يمكن التحقق منها بدرجة واحدة من الصحة على الأرض أو في القطار أو على السفينة . لكن صعوبة تنشأ عندما يأخذ راصدان منتميان إلى مرجعين مختلفين بمناقشة نتائج رصد حادث واحد كما يراه كل منهما من مرجعه . ليكن هذا الحادث حركة جسيم واحد مرصودة من هذين المرجعين — من الأرض ومن القطار المتحرك بانتظام ؛ كلاهما مرجع عطالي . فهل يكفي أن نعرف نتيجة الرصد في أحد المرجعين كي نجد منها نتيجة الرصد في المرجع الآخر إذا كنا نعرف سرعة أحدهما بالنسبة للآخر ووضع أحدهما بالنسبة للآخر في لحظة معينة ؟ إن من المهم جداً ، في توصيف الحوادث ، أن نعرف كيف نمر من مرجع لآخر ، طالما كان المرجعان متكافئين وكان كل منهما صالحاً لتوصيف الحركات في الطبيعة . الواقع أنه يكفي ، في الظروف المذكورة ، أن نعرف النتائج التي حصل عليها راصد في مرجعه كي نعرف النتائج التي حصل عليها الراصد الآخر في مرجعه .

لنتأمل في هذه المسألة بكثير من التجريد ، أي دون أن نستخدم قطاراً أو سفينة . ولتبسيط المسألة ندرس الحركة على خط مستقيم فقط . قضيب صلب مدرج وميقاتية جيدة . يمثل

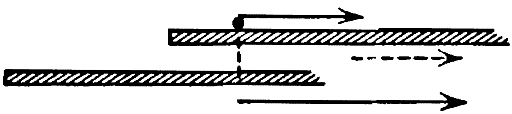
القضيب ، في الحركة المستقيمة ، مرجعاً كالمسطره المستخدمة قرب البرج في تجربة غاليله تماماً . إلا أن من الأبسط والمستحسن دوماً أن نمثل ، في الحركة المستقيمة ، المرجع بقضيب صلب وأن نمثل المرجع ، في حالة حركة اختيارية في الفراغ ، بتجميع من القضبان المتوازية والمتعامدة لا بأبراج وجدران وشوارع وأشياء أخرى . لنفترض ، كمثال بسيط ، أن لدينا مرجعين أي قضيبين صلبين ؛ لنرسمهما واحداً فوق الآخر (شكل ٥٣) . سندعوهما المرجع « العلوي » والمرجع « السفلي » . ونفترض أن المرجعين يتحركان ، أحدهما بالنسبة للآخر ، بسرعة معينة بحيث ينزلق أحدهما على الآخر . كما أن من المفيد أن يكونا طويلين قدر ما نريد بحيث يكون لكل منهما مبدأ ولايكون له نهاية . إن ميقاتية واحدة تكفي للمرجعين لأن انسياب الزمن واحد بالنسبة لكليهما . نبدأ الرصد لحظة انطباق مبدأيهما ، وعندئذٍ يتعين موضع نقطة مادية بالعدد نفسه عليهما : أي أنها تنطبق على خط من المسطرة المدرَّجة . وهكذا نرى عدداً يعين مكان النقطة المادية . لكن إذا تحرك أحد القضيبين بالنسبة للآخر فإن الأعداد المتقابلة منهما سوف تختلف بعد زمن ، ولنقل ثانية واحدة . لنتأمل نقطة مادية ساكنة على القضيب العلوي . فالعدد الذي يعبر عن مكانها في المرجع العلوي لايتغير بمرور الزمن . لكن العدد المقابل لها على القضيب السفلي سيتغير . وبدلاً من أن نقول العدد المقابل لمكان « النقطة » سنقول اختصاراً **إحداثي النقطة** . هذا ورغم أن النص الذي سنسوقه الآن معقد بعض الشيء إلا أن الرسم يؤكد صحته ويدل على أنه شيء بسيط جداً : إن إحداثي نقطة في المرجع السفلي يساوي إحداثيَّها في المرجع العلوي مضافاً إليه إحداثي نقطة بدء المرجع العلوي في المرجع السفلي . إن بيت القصيد هنا هو أننا نستطيع دوماً حساب موضع الجسيم في مرجع إذا علمنا موضعه في المرجع الآخر . ولانحتاج ، في سبيل ذلك ، إلا لأن نعلم في كل لحظة وضع أحد المرجعين بالنسبة للآخر . إن هذا القول قد يبدو دقيقاً لكنه في الواقع بسيط جداً ، ويكاد لايستحق هذه المناقشة المفصلة لو لم يجب علينا أن نستفيد منه فيما بعد .

وقد يكون من المفيد أن نلاحظ أنه يوجد فرق بين تعيين موضع نقطة وبين تعيين زمن حادث . فلكل راصد قضيبه الخاص الذي يتخذه مرجعاً له ؛ ولكن لايوجد سوى ميقاتية واحدة للجميع . فالزمن شيء « مطلق » ينساب بأسلوب واحد لدى كل الراصدين في كل المراجع .



شكل (٥٣)

والآن إلى مثال آخر . رجل يتنزه بسرعة ثلاثة كيلومترات في الساعة على سطح سفينة . إنها سرعته بالنسبة للسفينة أو ، بتعبير آخر ، بالنسبة لمرجع مربوط بالسفينة . فإذا كانت سرعة السفينة ثلاثين كيلومتراً في الساعة ، وكانت حركة المتنزه وحركة السفينة في اتجاه واحد ، فإن سرعة المتنزه ستكون ثلاثة وثلاثين كيلومتراً في الساعة بالنسبة لرجل واقف على الشط ، أو ثلاثة كيلومترات في الساعة بالنسبة للسفينة . يمكن أن نعبر عن هذا الواقع بنص أكثر تجريداً : إن سرعة نقطة مادية في المرجع السفلي تساوي سرعتها في المرجع العلوي مضافاً إليها ، أو مطروحاً منها (حسبما يكون للسرعتين اتجاه واحد أو اتجاهان متعاكسان على الترتيب نفسه) سرعة المرجع العلوي بالنسبة للمرجع السفلي ؛ فنحن نستطيع إذن دوماً أن نحوِّل ، لا المواضع فقط ، بل والسرع أيضاً لدى المرور من مرجع لآخر إذا علمنا سرعة أحد المرجعين بالنسبة للآخر . وبنتيجة ذلك كله نرى أن المواضع ، أي الإحداثيات ، والسرع هي نماذج لمقادير تتفاوت قيمها بتفاوت المراجع وأن التفاوت في كل مقدار يطيع **قانون تحويل** خاصاً به ؛ وقانونا تحويل الموضع والسرعة ، في أمثلتنا الراهنة ، بسيطان جداً .

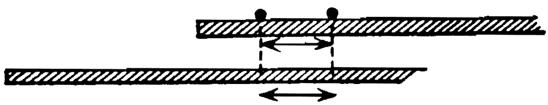


شكل (٥٤)

على أنه يوجد مقادير لاتتغير قيمها من مرجع لآخر ، فلا حاجة بها لقانون تحويل . لنأخذ كمثال نقطتين ، لا نقطة واحدة ، ثابتتين في موضعيهما على القضيب العلوي . لنتأمل في المسافة بينهما . إنها الفرق بين إحداثيي النقطتين . ولإيجاد موضعي النقطتين في مراجع أخرى يجب أن نستخدم قانون تحويل الموضع . لكننا لدى حساب الفرق بين الموضعين نرى بسهولة أن الإسهامين الناجمين ، في تحويل الموضعين إلى أي مرجع آخر ، سيعدم كل منهما الآخر ، كما هو واضح على الشكل ٥٥ ؛ أي أننا يجب أن نجمع ونطرح المسافة بين مبدأي المرجعين . فالمسافة بين نقطتين هي إذن **لامتغيرة** لدى الانتقال من مرجع لآخر ، أي أنها مستقلة عن اختيار المرجع .

وكمثال آخر على مقدار مستقل عن اختيار المرجع ، أي مقدار لامتغير ، نسوق **تغير** السرعة ، وهو مفهوم صادفناه في الميكانيك . نعتبر من جديد نقطة مادية متحركة على خط مستقيم

ونرصدها من مرجعين . إن تغير سرعتها هو ، في كل من المرجعين ، فرق بين سرعتين . فلدى استعمال قانون تحويل السرعة مرتين ، مرة لكل من هاتين السرعتين ، فإن إسهامي السرعة الثابتة ، لأحد المرجعين بالنسبة للآخر ، سيعدم أحدهما الآخر لدى حساب الفرق بين السرعتين في المرجع الذي ننتقل إليه . فلا يبقى في هذا الفرق سوى الفرق الذي كان موجوداً في المرجع الذي انتقلنا منه . فتغير السرعة هو إذن مقدار لامتغير لدى الانتقال من مرجع لآخر ، شرط أن تكون سرعة أحد المرجعين ، بالنسبة للآخر ، منتظمة طبعاً ، ماذا وإلا يصبح تغير السرعة متفاوت القيمة بين مرجع وآخر : وهذا التفاوت ينجم بالطبع عن تغير سرعة أحد القضيبين ، الممثلين للمرجعين ، بالنسبة للآخر .



شكل (٥٥)

والآن إلى مثال أخير . لدينا نقطتان ماديتان تتبادلان قوة لاتتعلق إلا بالمسافة بينهما . فلما كانت المسافة ، في الحركة المنتظمة ، لامتغيرة فإن القوة تكون لامتغيرة أيضاً . وعلى هذا فإن قانون نيوتن ، الذي يربط بين القوة وتغير السرعة ، يكون صحيحاً في المرجعين . وهكذا نتوصل مرة أخرى إلى نتيجة تؤكدها الخبرة اليومية : إذا كانت قوانين الميكانيك صحيحة في مرجع ما ، فإنها تظل صحيحة في أي مرجع متحرك بالنسبة له حركة مستقيمة منتظمة . لقد كان مثالنا بسيطاً جداً ؛ إنه حركة مستقيمة يمكن أن يتمثل فيها المرجع بقضيب صلب . لكن النتائج التي توصلنا إليها صحيحة بشكل عام ويمكن إيجازها فيما يلي :

١ ــ لانعرف أية وسيلة لإيجاد مرجع عطالي . ولكن إذا أُعطينا مرجعاً عطالياً واحداً ، نستطيع أن نجد عدداً لامتناهياً من مراجع عطالية أخرى . لأن أي مرجع متحرك حركة مستقيمة منتظمة بالنسبة لأي مرجع عطالي هو أيضاً مرجع عطالي (أي أن قانون العطالة فيه صحيح وكل قوانين الميكانيك الأخرى) .

٢ ــ إن زمن وقوع حادث ما ، هو نفسه في كل المراجع . لكن الإحداثيات والسرع تتفاوت بين مرجع وآخر ، وتغيراتها تطيع قوانين التحويل .

٣ ــــ رغم أن الإحداثيات والسرع تتغير عندما ننتقل من مرجع لآخر ، فإن المسافة وتغير السرعة والقوة ، وبالتالي قوانين الميكانيك ، لامتغيرة كلها بالنسبة لقوانين التحويل .

هذا وإن قوانين التحويل المصوغة هنا ، من أجل الإحداثيات والسرع ، تسمى **قوانين** التحويل في الميكانيك التقليدي ، أو بعبارة أقصر ، **التحويل التقليدي** .

الأثير والحركة

إن مبدأ النسبية الغاليلي صحيح من أجل الظواهر الميكانيكية . أي أن قوانين الميكانيك تنطبق كما هي في كل المراجع التي تتحرك حركة منتظمة ، واحداً بالنسبة لآخر . فهل هذا المبدأ صحيح أيضاً من أجل الظواهر غير الميكانيكية ؟ إن كل المسائل التي تتركز حول هذا السؤال تقود مباشرة إلى نقطة انطلاق نظرية النسبية .

لنتذكر أن سرعة الضوء في الخلاء ، أو بتعبير آخر ، في الأثير تساوي ٣٠٠ ٠٠٠ كيلومتر في الثانية ، وأن الضوء موجة كهرطيسية تنتشر في الأثير ، وأن الحقل يحمل طاقة ، وهي ، بمجرد صدورها من المنبع ، تحيا وجوداً مستقلاً عن المنبع . وفي الوقت الحاضر نود أن نبقى على اعتقادنا بأن الأثير وسط تنتشر فيه الأمواج الكهرطيسية وكذلك أمواج الضوء أيضاً ، بالرغم من شعورنا بأن غالبية الصعوبات تنشأ عن بنيته الميكانيكية .

لنفترض أننا جالسون في غرفة مغلقة تماماً على العالم الخارجي لدرجة أن الهواء لايمكنه أن يدخل فيها ولا أن يخرج منها . فإذا كنا نتحدث دون أن نتحرك فإننا نولد ، بلغة الفيزياء ، أمواجاً صوتية تنتشر من المنبع الساكن سائرة بسرعة الصوت في الهواء . وإذا لم يكن يوجد هواء ، أو وسط مادي آخر فيما بين المتحدثين ، فلايمكن أن يصل إليهم أي صوت . وتدل التجارب على أن سرعة الصوت في الهواء واحدة في جميع الاتجاهات إذا كان الجو خالياً من الرياح وكان الهواء في المرجع المختار ساكناً .

لنتصور الآن أن الغرفة تتحرك في الفضاء بسرعة منتظمة . ولنفترض أن رجلاً من خارج الغرفة المتحركة (أو القطار إذا شئتم) يرى ما يحدث فيها من خلال جدرانها الزجاجية . يمكن لهذا الراصد الخارجي أن يقوم ، وهو في مكانه ، بقياسات على ما يجري داخل الغرفة ، يستنتج منها سرعة الصوت بالنسبة له نفسه ، أي في المرجع المرتبط بالعالم الخارجي عن الغرفة والذي تتحرك

الغرفة بالنسبة إليه . وهنا تتجلى من جديد المسألة القديمة ، التي بحثناها ، وهي تعيين السرعة في مرجع ما ، إذا علمنا قيمتها في مرجع آخر .

إن الراصد الموجود داخل الغرفة يقول : إن سرعة الصوت ، كما أراها ، واحدة في كل الاتجاهات .

أما الراصد الموجود خارج الغرفة فيقول إن سرعة الصوت الذي ينتشر في الغرفة المتحركة ، بموجب نتائج القياسات التي أقوم بها من مرجعي ، ليست واحدة في كل الاتجاهات . إنها ، في اتجاه حركة الغرفة ، أكبر من سرعة الصوت النظامية التي أعرفها ؛ أما في عكس اتجاه حركة الغرفة فهي أصغر من ذلك .

لقد كان بإمكاننا نحن أن نتنبأ بنتائج كل من الراصدين ، وذلك بموجب قانون تحويل السرعة من مرجع عطالي لمرجع آخر عطالي . وهنا نرى التجربة تؤكد ذلك . فالغرفة المتحركة مرجع عطالي ينقل معه الراصد الداخلي والمادة التي تملأ جو الغرفة ، أي الهواء الذي يحمل الأمواج الصوتية . فالغرفة وهواؤها والراصد الداخلي مرجع واحد . أما الراصد الخارجي فهو بحد ذاته مرجع عطالي آخر . ولهذا السبب تختلف سرعة الصوت من راصد لآخر .

يمكن أن نستخلص بعض نتائج أخرى من النظرية القائلة بأن الصوت موجة تنتشر في وسط مادي . وخير برهان على ذلك ، وربما هو ليس أبسط برهان ، هو أننا لانسمع صوت المتحدث إذا كنا نركض مبتعدين عنه بسرعة أكبر من سرعة الصوت في الهواء المحيط بالمتحدث . فلا يمكن عندئذٍ للأمواج الصوتية الصادرة عن فمه أن تصل إلى آذاننا . وعلى هذا ، إذا فاتنا سماع جملة مهمة من خطيب مفوه فما علينا سوى أن نركض بسرعة أكبر من سرعة الصوت كي نلحق بالموجة التي تحمل هذه الجملة . وما من شيء يخالف المنطق في هذه التجارب ؛ اللهم إلا أننا ، في الحالتين ، يجب أن نركض بسرعة تربو على ٣٥٠ متراً في الثانية الواحدة ؛ ولامانع من أن نأمل أن يتوصل التقدم التقني إلى تحقيق سرعة من هذا القبيل . إن القذيفة المنطلقة من مدفع تتحرك بأسرع من الصوت في الهواء ، والراكب الذي يمتطي صهوة هذه القذيفة لايسمع صوت الانفجار الذي أطلقها من المدفع .

إن لكل هذه الأمثلة سمة ميكانيكية . ويمكننا الآن أن نطرح أسئلة هامة : هل يمكن أن نكرر ما قلناه ، بخصوص الموجة الصوتية ، في حالة الموجة الضوئية ؟ أي : هل مبدأ النسبية الغاليلي

والتحويل التقليدي يصلحان في الظواهر الضوئية والكهربائية أيضاً كما يصلحان في الظواهر الميكانيكية ؟ قد نخوض مغامرة لاتحمد عقباها إذا أجبنا عن هذا السؤال بـ « نعم » أو « لا » قبل أن نفحص معناه بشكل عميق .

إن دراسة الموجة الصوتية في الغرفة المتحركة بانتظام بالنسبة للراصد الخارجي ، تستند ، كما رأينا وقبل استخلاص النتائج ، إلى الملاحظتين الأساسيتين المرحليتين التاليتين :

إن الغرفة المتحركة تنقل معها الهواء الذي تنتشر فيه الموجة الصوتية .

إن قيمتي السرعة ، المرصودة من مرجعين يتحرك أحدهما بانتظام بالنسبة للآخر ، مرتبطتان فيما بينهما بالتحويل التقليدي .

إن المسألة المقابلة لذلك ، في الضوء ، تنطرح بشكل مختلف قليلاً . فالراصدون في الغرفة لايتكلمون بل يرسلون إشارات ضوئية ، أي أمواجاً ضوئية ، في كل الاتجاهات . وسنفترض ، فوق ذلك ، أن منابع الضوء تبقى ساكنة في الغرفة . فالأمواج الضوئية تنتشر في الأثير الذي يملأ الغرفة كما كانت الأمواج الصوتية تنتشر في هوائها .

هل ينجرف الأثير مع الغرفة كما يفعل الهواء ؟ إن الإجابة عن هذا السؤال صعبة جداً لأننا ليس لدينا أية صورة ميكيانيكية للأثير . إذا كانت الغرفة مغلقة فإن الهواء الداخلي مجبر على الحركة معها . لكن هذه الفكرة في حالة الأثير لامعنى لها لأن المادة كلها غارقة في الأثير الذي يدخل إلى أعمق أحشائها . فلايوجد باب مغلق في وجه الأثير . إن « الغرفة المتحركة » تعني لنا الآن مرجعاً متحركاً يرتبط به المنبع الضوئي ارتباطاً متماسكاً . على أننا لايصعب علينا مع ذلك أن نتصور أن الغرفة تجر الأثير معها كما كانت تجر منبع الصوت والهواء الموجودين فيها . لكننا يمكننا أن نتصور العكس أيضاً : أي أن الغرفة تتحرك عبر الأثير ، كالسفينة عبر بحر هادىء تماماً ، ولاتجر أي جزء من الوسط بل تتحرك ببساطة خلاله[1] . ففي الصورة الأولى تجرف الغرفة المتحركة الأثير معها كما تجرف كل شيء فيها ، والتشابه مع الموجة الصوتية يصح عندئذٍ ويقود إلى نتائج مماثلة لتلك تماماً . أما في الصورة الثانية فلا تجر الغرفة الأثير في حركتها كما تجر منبع الضوء ، فيفسد التشابه مع الموجة

---

(١) ربما كان أفضل تشبيه لذلك هو صورة منخل يتحرك في حوض ماء ساكن . فالمنخل لايجر الماء معه لأن الماء ينفذ من خلال ثقوبه . وبهذا الشكل ينفذ الأثير من خلال الفجوات بين جسيمات جدران الغرفة فلاينجرف معها . (المترجم) .

الصوتية ونحصل ، في حالة الموجة الضوئية ، على نتائج تختلف عن النتائج السابقة . وبالإضافة إلى هاتين الإمكانيتين المتطرفتين يمكن أن نتصور إمكانية ثالثة وسطاً بينهما ، أي أن الأثير ينجر جزئياً مع الغرفة ومنبع الضوء . لكننا لانرى سبباً لمناقشة هذه الإمكانية المعقدة قبل أن نسأل التجربة رأيها في الصورتين المتطرفتين .

نبدأ بالصورة الأولى حيث ينجر الأثير مع حركة الغرفة ومنبع النور المرتبط بها . فإذا احتفظنا بالثقة في قانون التحويل التقليدي وبصلاحيته في حالة الأمواج الضوئية ، كما فعلنا مع الأمواج الصوتية ، أمكن أن نصل تماماً إلى نتائج مماثلة لتلك . ولايوجد سبب وجيه حتى الآن يبيح لنا أن نرتاب في قانون تحويل السرع الميكانيكي الذي يفيد بأن السرع تنضاف معاً في بعض الحالات وتنطرح ، واحدة من الأخرى ، في حالات أخرى ؛ وهكذا نتمسك في الوقت الحاضر بانجراف الأثير مع الغرفة المتحركة والمنبع الضوئي المرتبط بها ، كما نتمسك بقانون تحويل السرع التقليدي .

إذا كان منبع الضوء مرتبطاً ارتباطاً سكونياً محكماً بالغرفة المتحركة وإذا صدرت عنه إشارة ضوئية فإن هذه الإشارة تنتشر ، كما تؤكد التجربة ، بسرعة ٣٠٠٠٠٠ كيلومتر في الثانية . لكن الراصد خارج الغرفة يرى حركتها وحركة المنبع الموجود داخلها . ولما كان الأثير ينجرف معهما فلابد أن **يستنتج** ما يلي : إن سرعة الضوء في مرجعي الخارجي تختلف باختلاف جهة انتشاره ؛ فهي أكبر من الطبيعي في جهة حركة الغرفة وأصغر من الطبيعي في الجهة المعاكسة . أما نحن فنستنتج : إذا كان الأثير ينجرف مع الغرفة والمنبع المتحركين معاً ، وإذا كانت قوانين التحويل التقليدي باقية على صحتها فلابد لسرعة النور من أن تتعلق بسرعة منبعه ، أي لابد ، مثلاً ، من أن يصلنا النور الآتي من منبع يتقدم نحونا ، بأسرع مما يصلنا لو كان المنبع يبتعد عنا .

هذا ولو كنا نستطيع أن نهرب أمام النور بسرعة أكبر من سرعته لما تمكنت الإشارة الضوئية من اللحاق بنا . ولو كنا نستطيع أن نركض وراء النور ، الصادر عن حوادث فاتتنا رؤيتها ، بأسرع من النور لأمكننا اللحاق به ولاستطعنا أن نرى حوادث الماضي ولكن بترتيب يعاكس ترتيبها الذي كان ! فكأننا نرى فلماً سينمائياً يعرض « بالمقلوب » ، أي بدءاً من نهايته . إن كل هذه النتائج ناجمة عن افتراض أن المرجع المتحرك يجرف معه الأثير ، وأن قوانين التحويل الميكانيكي صحيحة ، فيصبح التشابه بين الصوت والضوء تاماً .

لكن لايوجد أية سمة توحي بصحة هذه النتائج . فهي ، على العكس من ذلك ، منقوضة في كل التجارب التي أنشئت لوضعها على المحك العملي . ولايوجد أدنى شك في حكم التجربة

عليها ، بالرغم من أن هذه الإدانة قد صدرت عن تجارب غير مباشرة ، وذلك للصعوبات الفنية الكبيرة الناجمة عن عظم سرعة النور . **إن سرعة النور واحدة في كل المراجع ، سواء كان منبعه ساكناً أم متحركاً ومهما كان أسلوب حركة هذا المنبع .**

لامكـان هنـا للوصف التفصيلي للتجـارب العديدة التي أكدت هذه النتيجـة . بيد أن بالإمكان إيراد بعض الحجج البسيطة التي ، بالرغم من أنها لاتثبت بشكل قاطع استقلال سرعة الضوء عن حركة منبعه ، يمكنها مع ذلك أن تجعل هذه الفكرة مقنعة ومفهومة .

إن الأرض والكواكب الأخرى . في منظومتنـا الشمسية ، تتحرك دائرة حول الشمس . ونحن لانعرف اليوم منظومات كوكبية تشبه منظومتنا . ولكن يوجد كثير من النجوم المضاعفة ، أي أن كلاً منها يتألف من جرمين يدوران حول نقطة تقع بينهما تسمى مركز ثقلهما . إن رصد حركة أي نجم مضـاعف يثبت صحة قانون نيوتن في التثاقل . لنفترض أن سرعة الضوء تتعلق بسرعة منبعه . سيكون عندئذٍ الشعاع الضوئي الذي ينطلق من النجم ذا سرعة متفاوتة كبراً وصغراً حسبما يكون النجم ، لحظة إصدار الشعاع ، مقترباً منا أو مبتعداً عنا . ولما كانت كل المعلومات ، التي تصلنا من الأجرام السماوية ، محمولة على الأشعة الضوئية الواردة منها ، فلو تفاوتت سرعة النور على الشكل المذكور لشاهدنا اضطراباً في حركة جرمي النجم المضاعف ولاستحال علينا بالتالي أن نتأكد من صحة قانون التثاقل الذي يتحكم واضحاً في منظومتنا الكوكبية .

لنتأمل في تجربة تعتمد على فكرة بسيطة جداً في دولاب يدور بسرعة كبيرة حول محوره ، فإذا افترضنا أثيراً مجروراً بحركة الدولاب ومشتركاً في هذه الحركة ، فإن أية موجة ضوئية مارة قرب الدولاب لابد أن تتغير سرعتها عندما يبدأ الدولاب بالدوران ؛ لأن سرعة الموجة في الأثير المتحرك المجرور بالدولاب لابد أن تختلف عن سرعة الموجة في الأثير الساكن ، كما تختلف سرعة الصوت في الريح عن سرعة الصوت في الهواء الساكن . لكن التجربة لم تكشف أي مفعول من هذا القبيل .

إن كل ذلك وسواه يدل على أن حكم الطبيعة ، بإدانة فرضية الأثير المجرور بالحركة ، هو حكم مبرم ؛ وذلك من أي جانب تناولنا هذا الموضوع ومهما كان نوع التجربة الحاسمة التي نقوم بها . وهكذا تصبح نتائج دراستنا ، المدعومة بحجج مفصلة ، على الشكل التالي :

إن سرعة الضوء لاتتعلق بسرعة منبعه .

لايجب الافتراض بأن الأجسام المتحركة تجرف الأثير الذي يغمرها .

وهكذا نضطر إلى هجر التشابه بين الأمواج الصوتية والأمواج الضوئية وإلى العودة إلى الإمكانية الثانية : أي أن المادة تتحرك من خلال الأثير وهو لايتأثر بحركتها . وهذا يعني أننا نفترض وجود بحر من الأثير تكون كل المراجع إما ساكنة فيه وإما متحركة بالنسبة له . ولندع جانباً ، في الوقت الحاضر ، قضية معرفة فيما إذا كانت التجربة تؤيد أو تنفي هذا الافتراض ؛ لأن من الأجدى لنا أن نتعود على مغزى هذا الافتراض الجديد وعلى النتائج التي تترتب عليه .

يوجد مرجع ساكن بالنسبة لبحر الأثير . إن أياً من المراجع العديدة ، المتحركة بانتظام واحداً بالنسبة لآخر ، لايتمتع في علم الميكانيك بأية مزية خاصة ؛ فكل هذه المراجع متساوية في « الجودة » أو في « السوء » . وإذا كنا إزاء مرجعين متحركين ، واحداً بالنسبة للآخر ، بسرعة منتظمة فلا معنى ، في الميكانيك ، لأن نتساءل أيهما الساكن وأيهما المتحرك . وكل ما يجب اعتباره هو الحركة النسبية ، بسبب مبدأ النسبية الغاليلي . فماذا يعني قول الأقدمين بوجود مرجع « مطلق » أو حركة « مطلقة » ، لاحركة **نسبية** فحسب ؟ إنه يعني ببساطة وجود مرجع تكون فيه بعض قوانين الطبيعة مختلفة عن القوانين السائدة في كل المراجع الأخرى ؛ كما أنه يعني أيضاً أن كل راصد يستطيع أن يعرف فيما إذا كان مرجعه ساكناً أم متحركاً بالنسبة للأثير ، وذلك بمقارنة القوانين الصالحة في مرجعه بالقوانين الصالحة في المرجع الواحد الأحد الذي يحتكر صفة « الإطلاق » ويُعتبر نموذجاً لهذه الصفة . هذا في الميكانيك التقليدي . أما الوضع فمختلف تماماً هنا لأن الحركة المنتظمة المطلقة مفهوم خال من أي معنى بموجب قانون غاليله في العطالة .

ما هي النتائج التي يمكن أن نستخلصها في مجال ظواهر الحقل لو اعتمدنا الآن الحركة من خلال الأثير ؟ إن هذا يعود إلى القول بوجود مرجع متميز عن كل المراجع الأخرى ، ساكن في بحر الأثير . من الواضح عندئذٍ تماماً أن بعض قوانين الطبيعة لابد أن تكون ذات شكل خاص في هذا المرجع وإلا فإن جملة « حركة خلال الأثير » تصبح عديمة المعنى . فلو بقي مبدأ النسبية الغاليلي صحيحاً فيه ، مثلاً ، فإن الحركة خلال الأثير تفقد كل ميزة . وبذلك ندرك استحالة التوفيق بين هاتين الفكرتين . لأن وجود هذا المرجع المتميز المرتبط بالأثير يعطي وحده معنى لجملة « حركة مطلقة » أو جملة « سكون مطلق » .

وهكذا وبعد أن جربنا أيضاً فرضية الأثير المجروف بالحركة ، في سبيل إنقاذ مبدأ النسبية الغاليلي ، ووصلنا إلى تناقض مع التجربة ، لم يبق لدينا أي خيار معقول ، اللهم إلا إذا تخلينا عن مبدأ النسبية الغاليلي وجربنا أن نفترض أن كل الأجسام تتحرك خلال الأثير الساكن .

ولأجل ذلك علينا ، في البدء ، أن نتأمل في بعض النتائج التي يمكن أن تتعارض مع مبدأ النسبية الغاليلي وأن تدعم فرضية الحركة خلال الأثير ، وأن نضعها من ثم على محك التجربة . قد يكون من السهل أن نتصور مثل هذه التجارب ، بيد أن تنفيذها صعب جداً . ولكن ، بما أننا لانهتم هنا إلا بالأفكار ، فلا بأس من أن نضرب صفحاً عن الصعوبات الفنية .

نعود من جديد إلى غرفتنا المتحركة وإلى راصدينا الموجودين ، أحدهما داخل الغرفة والآخر خارجها . الراصد الخارجي يمثل المرجع النموذجي المرتبط ببحر الأثير الساكن ، أي المرجع المتميز الذي لسرعة الضوء فيه دوماً القيمة النظامية . فالضوء الصادر عن كل المنابع الضوئية ، سواء كانت متحركة أو ساكنة في بحر الأثير الساكن ، ينتشر بالسرعة نفسها . لنتصور أن نوراً متقطعاً ينبثق من منبع في وسط الغرفة ذات الجدران الشفافة التي تتيح لكل من الراصدين ، الداخلي والخارجي ، أن يقيس سرعة النور . فلو طلبنا من كل من الراصدين أن يقول لنا النتائج التي **يتوقع** الحصول عليها ، فلابد أن يجيبا كما يلي (قبل إجراء القياسات) :

الراصد الخارجي : إن مرجعي مرتبط ببحر الأثير الساكن . إن سرعة النور في مرجعي واحدة دوماً . ولذا فلا يهمني أن أعرف إذا كان منبع الضوء متحركاً أم لا ، أو كانت الأجسام الأخرى متحركة أم لا ؛ لأنها ، على كل حال ، لاتجرف معها بحر الأثير الذي أعتبر نفسي جزءاً منه وفيه . إن مرجعي متميز عن كل مرجع آخر ، ولابد أن تكون لسرعة النور القيمة النظامية مهما كانت جهة انتشار الشعاع الضوئي أو أسلوب حركة منبعه .

الراصد الداخلي : إن غرفتي تتحرك خلال بحر الأثير . إن أحد جدرانها يهرب أمام الضوء ؛ أما الجدار المقابل له فيتقدم للقائه . إذا كانت غرفتي تتحرك ، بالنسبة لبحر الأثير ، بسرعة النور فإن النور المنبعث من مركز الغرفة لن يصل أبداً للجدار الذي يهرب أمامه بسرعة النور . أما إذا كانت غرفتي تتحرك بسرعة أقل من سرعة النور فإن الموجة الضوئية المنبعثة من مركز الغرفة ستلتقي أحد الجدارين قبل الآخر ، وهو الجدار الذي يتقدم نحوها . وهكذا ، ورغم أن منبع الضوء مربوط بمرجعي بسكون ، فإن سرعة الضوء لن تكون واحدة في كل الاتجاهات . إنها ستكون أصغر باتجاه حركة الغرفة في الأثير ، أي نحو الجدار الذي يهرب أمام الضوء ، منها في الاتجاه المعاكس ، أي نحو الجدار الذي يتقدم للقائه .

ينتج من مقارنة هذين القولين أن سرعة الضوء ، في رأي الراصدين ، لاتكون واحدة في كل

الاتجاهات إلا في المرجع المتميز ، أي الساكن في بحر الأثير . أما في مراجع أخرى ، متحركة في بحر الأثير ، فإن سرعة الضوء تتعلق بجهة الانتشار التي نقيسها وفقها .

إن المحاكمة الحاسمة التي أتينا على شرحها تدفعنا لأن نضع ، على محك التجربة ، نتائج فرضية الحركة خلال بحر الأثير الساكن . إن الطبيعة تضع بالفعل تحت تصرفنا مرجعاً يتحرك بسرعة كبيرة لدرجة كافية : إنها الأرض في حركتها السنوية حول الشمس . إذا كانت فرضيتنا واقعية فإن سرعة الضوء في اتجاه حركة الأرض لابد أن تختلف عن سرعته في الاتجاه المعاكس . فبمعرفة سرعة الأرض ، ٣٠ كيلومتراً في الثانية تقريباً ، يمكن أن نحسب الفرق بين سرعتي الضوء في الاتجاهين وأن نركب تجربة ملائمة لقياس هذا الفرق إن وجد . وبسبب صغر الفرق الزمني الذي يستتبعه هذا القياس ، بموجب فرضيتنا ، يجب اختراع تركيب تجريبي فذ دقيق . وهذا ما حققه مايكلسون ومورلي في تجربتهما الشهيرة . فماذا كانت النتيجة ؟ لقد كانت حكماً بـ « الموت » على نظرية بحر الأثير الساكن الذي يراد للمادة أن تتحرك خلاله . لم يظهر في هذه التجربة أي دليل على أن سرعة الشعاع الضوئي تتعلق بمنحى انتشاره في مرجع الأرض المتحركة حول الشمس . هذا ولو كانت هذه النظرية صحيحة لما كانت سرعة النور وحدها هي التي يجب أن تتعلق بحركة المرجع الذي نقيسها منه بل إن ظواهر حقلية أخرى كان يجب أن تتصف بهذه الصفة . لكن كل التجارب قد أدت ، بهذا الصدد ، إلى نتائج سلبية كنتيجة تجربة مايكلسون ــ مورلي ، إذ لم يظهر أي تأثير لحركة الأرض في هذه التجارب كلها .

وهكذا نجد أنفسنا مسوقين إلى وضع أكثر فأكثر إرباكاً . فقد أصدرنا افتراضين متعاكسين : يقول أولهما بأن الأثير ينجرف مع الأجسام المتحركة ؛ لكن واقع أن سرعة الضوء لاتتعلق بحركة منبعه يناقض هذا الافتراض . ويقول ثاني الافتراضين بأن الأثير لاينجرف مع الأجسام المتحركة وأنه يوجد بالتالي مرجع متميز ساكن في بحر الأثير ؛ وعندئذٍ لايكون مبدأ النسبية الغاليلي صحيحاً ولايمكن لسرعة الضوء أن تكون واحدة في كل المراجع ، وهذا ما تنفيه التجربة أيضاً . فما العمل ؟

لقد جُربت ، للخروج من هذا المأزق ، نظريات مصطنعة عديدة ترى أن الحقيقة لابد موجودة بين هاتين الفرضيتين المتعاكستين ، أي أن الأثير ينجرف جزئياً مع الأجسام المتحركة . لكن كل هذه النظريات أخفقت . إن كل المحاولات التي هدفت إلى تفسير الظواهر الكهرطيسية في

مراجع متحركة ، سواءً بواسطة انجراف الأثير أو بواسطة الحركة من خلاله أو بواسطة الفكرتين معاً ، باءت بالفشل الذريع .

وهكذا وجد الفيزيائيون أنفسهم في وضع هو أكثر الأوضاع مأساوية في تاريخ العلم . فكل الافتراضات بخصوص الأثير لم تسفر عن شيء . لقد كان حكم التجربة سلبياً مقنطاً . وبإلقاء نظرة إلى الوراء على تطور الفيزياء نرى أن الأثير ، منذ ولادته ، كان يلوح أنه سيكون « الولد الرهيب » في عائلة الهيولات الفيزيائية . فقد ظهر أن بناء صورة ميكانيكية بسيطة للأثير كان عملاً مستحيلاً وجب التخلي عنه ؛ فكان هذا أحد الأسباب الحاسمة في انهيار الرؤية الميكانيكية . هذا أولاً . ولقد اضطررنا ، ثانياً ، إلى فقدان الأمل بأن نجد ، بفضل فكرة بحر الأثير ، مرجعاً متميزاً يتيح لنا أن نكشف الحركة المطلقة ، لا الحركة النسبية فحسب . ولقد كان هذا سيصبح الوسيلة الوحيدة ، إذا استبعدنا نقل الأمواج الضوئية ، التي يتجلى بواسطتها الأثير ويبرر وجوده . لكن كل محاولاتنا لجعل الأثير حقيقة واقعة قد باءت بالفشـل . ولم نستطع ، لا اكتشـاف بنيته الميكانينكية ولا الحركة المطلقة . ولم يبق من صفاته سوى الصفة الوحيدة التي كانت سبب اختراعه ، وهي نقل الأمواج الكهرطيسية . أما نحن فلم نغنم من عناء هذه المحاولات سوى العجز والتناقضـات . وبعد هذه التجربة المريرة حان الوقت كي ننسى ذلك ونجتهد في أن لانلفظ اسمه بعد الآن أبداً . وسنقول : إن فضـاءنا يتمتع بخاصـة نقـل الأمواج الضـوئيـة ؛ وبذلك نتوقف عن استخدام كلمـة قررنا أن نتحاشاها .

لكن حذف كلمة من مفردات لغتنا ليس علاجاً للموقف . وإن قلقنا لأعمق من أن يهدأ بهذا الأسلوب .

لنعدد الآن الوقائع التي تم التأكد منها با لتجربة بشكل كاف ، دون أن نهتم أبداً بمشكلة الـ « أ ـــ ر » ..

١ ـــ إن سـرعة النور في الفضـاء الخالي هي نفسها في كل الظروف والاتجاهات ، وهي مستقلة عن حركة منبعه وعن حركة أي شيء يستقبل النور .

٢ ـــ إن جميع قوانين الطبيعة متطابقة تماماً في مرجعين متحركين ، واحداً بالنسبة للآخر ، حركة مستقيمة منتظمة ، ولايوجد أية وسيلة تكشف عن حركة منتظمة مطلقة .

يوجد تجارب عديدة تؤيد هذين النصين ولايوجد أية تجربة تناقض أياً منهما . فأولهما يعبر

عن ثبات سرعة النور ، وثانيهما يوسع مجال مبدأ النسبية الغاليلي ، الذي صيغ من أجل الظواهر الميكانيكية وحدها ، حتى يشمل كل ظواهر الطبيعة .

لقد تأكدنا في الميكانيك مما يلي : إذا كان لسرعة نقطة مادية قيمة ما ، في مرجع ما ، فإن قيمة هذه السرعة ستكون مختلفة في مرجع آخر متحرك بالنسبة للأول حركة منتظمة .وهذا ينتج من مبادئ بسيطة في التحويل الميكانيكي وهو نابع مباشرة من الحدس البدهي (العلاقة بين سرعة الرجل بالنسبة للسفينة وسرعته بالنسبة للشط) ولايمكن أن يوجد في الظاهر أي شك في ذلك . لكن قانون التحويل هذا مناقض لثبات سرعة الضوء . أي أننا ، بتعبير آخر ، إذا أضفنا إلى نصينا نصاً ثالثاً يقول :

٣ ــ إن المواضع والسرعات تتحول ، لدى الانتقال من مرجع عطالي إلى مرجع عطالي آخر ، وفق التحويل التقليدي ، فإن التناقض مع ثبات سرعة النور يصبح واضحاً . وعلى هذا فلايمكن أن نعتنق هذه النصوص الثلاثة معاً .

إن التحويل التقليدي يبدو بدهياً وبسيطاً لدرجة أننا لايخطر ببالنا أن نعدّله . ولكننا كنا جربنا أن نعدل ١ و ٢ فوصلنا إلى تناقض مع التجربة . فكل النظريات التي تخص حركة الـ « أ ــ ر » كانت تتطلب تعديل ١ و ٢ . لكن ذلك لم يجلب لنا الخير . وبذلك ندرك مرة أخرى قسوة صعوباتنا . فلامناص إذن من اعتناق فكرة جديدة ، وتتلخص بقبول **الافتراضين الأساسيين** ١ و ٢ ، **وبرفض** ٣ مهما بدا هذا غريباً . إن هذه الفكرة الجديدة تنطلق من تحليل أكثر المفاهيم بدهية ؛ وسنرى كيف يجبرنا هذا التحليل على تغيير مفاهيمنا القديمة وكيف يذلل صعوباتنا .

الزمن والمسافة والنسبية

لدينا إذن الافتراضان الجديدان :

١ ــ إن سرعة الضوء ، في الخلاء ، هي هي في كل المراجع التي تتحرك ، واحداً بالنسبة لآخر ، حركة منتظمة مستقيمة .

٢ ــ إن قوانين الطبيعة تبقى هي هي في كل المراجع التي تتحرك ، واحداً بالنسبة لآخر ، حركة منتظمة مستقيمة .

إن **نظرية النسبية** تبدأ بهذين الافتراضين . ونحن بعد الآن لن نستخدم التحويل التقليدي بسبب تعارضه معهما .

والواجب الرئيسي علينا ، هنا وكما هي الحال دوماً في العلم ، هو أن نتخلص من الأحكام المسبقة الراسخة في أعماقنا والتي نكررها ونؤمن بها دون تمحيص . فبما أن تعديل الفرضيتين ١ و ٢ يجعلنا ندخل في تناقض مع التجربة ، فما علينا سوى أن نتشجع للقبول بهما ولكي نتناول النقطة الوحيدة التي تبدو ضعيفة ، أي كيفية تحويل المواضع والسرع عندما ننتقل من مرجع لآخر (أي الفكرة ٣ أعلاه) . وفي سبيل ذلك نعمد إلى استخلاص نتائج أخرى من ١ و ٢ لكي نرى أين وكيف تتعارضان مع التحويل التقليدي ، ولكي نجد المعنى الفيزيائي لهذه النتائج .

ومرة أخرة نعود إلى الغرفة المتحركة والراصدين ، الداخلي والخارجي ، والإشارة الضوئية التي تنبعث من مركز الغرفة . ومن جديد نطلب منهما أن يشرحا **ما يتوقعانه** عندما يعتنقان فرضيتينا ، ١ و ٢ ، وينسيان ما قالاه من قبل بخصوص الوسط الذي ينتشر فيه الضوء فيجيبان :

الراصد الداخلي : إن الإشارة الضوئية التي تنبعث من مركز الغرفة ستصل في وقت واحد إلى الجدارين المتقابلين (أي أن الوصولين **متواقتان**) لأنهما متساويان في البعد عن المنبع الضوئي ولأن سرعة الضوء هي هي في كل الاتجاهات .

الراصد الخارجي : إن سرعة الضوء في مرجعي لاتختلف بشيء عن سرعته في مرجع الراصد المتحرك مع الغرفة . فلايهمني أن أعرف فيما إذا كان المنبع الضوئي ساكناً أم متحركاً في مرجعي لأن حركة المنبع لاتؤثر مطلقاً في سرعة النور . وكل ما أراه هو إشارة ضوئية تنتشر بسرعة واحدة في كل الاتجاهات . إن أحد الجدارين يهرب منها والآخر يذهب للقائها . ولذا فإن الإشارة ستصل إلى الجدار الهارب بعد قليل من التقائها الجدار المقترب منها . ورغم صغر هذا الفارق الزمني ، عندما تكون سرعة الغرفتين صغيرة إزاء سرعة الضوء ، فإن وصولي الإشارة إلى الجدارين المتقابلين ، العموديين على منحى الانتشار ، لن يكونا متواقتين في مرجعي على أية حال .

وبمقارنة هذين التوقعين نقع على نتيجة مذهلة تناقض وضوحاً المفاهيم التي تبدو راسخة في عرف الحس العام والفيزياء التقليدية . هناك حادثان ، هما وصولا شعاعي الإشارة الواحدة إلى الجدارين ، يراهما الراصد الداخلي متواقتين ويراهما الراصد الخارجي ، غير متواقتين . إن الفيزياء التقليدية تفترض ضمنياً وجود ميقاتية واحدة ، بمعنى أن الزمن ينساب واحداً لدى كل الناس ، أي أن ميقاتية واحدة تكفي ، ويمكن أن تخدم كل الراصدين في أي مرجع كانوا ، شريطة أن يروها فقط . وعلى هذا فإن العبارات التي مثل « تواقت » و « قبل » و « بعد » كان لها معنى مطلق مستقل

عن أي مرجع يرصد الزمن منه . فالحادثان اللذان يبدوان متواقتين من مرجع ما ، لابد ، في عرف الفيزياء القديمة ، من أن يبدوا متواقتين أيضاً من أي مرجع آخر .

إن الافتراضين ١ و ٢ ، أي نظرية النسبية الحديثة ، يجبران على التخلي عن وجهة النظر هذه . فقد واجهنا لدى الراصدين حادثين متواقتين في مرجع أحدهما وغير متواقتين في مرجع الآخر . وعلينا الآن أن نفهم المعنى العميق لهذه النتيجة التي تصدم الحس العام وأن نتمعن في مغزى الاقتراح التالي : « إذا كان حادثان متواقتين في مرجع ما ، فليس هما متواقتين بالضرورة في مرجع آخر » . ماذا نعني ، أولاً ، بعبارة « حادثان متواقتان في مرجع » ؟ إن كلاً منا يظن نفسه عارفاً بالسليقة معنى كل ذلك . ولكن لنقرر بعد الآن أن نرتاب بكل ما توحي به السليقة وأن نحاول إعطاء تعاريف دقيقة ربما ندرك منها مدى الخطر الكامن في الثقة التامة بالحس البدهي . لنجب في البدء عن السؤال التالي :

ــ ما هي الميقاتية ؟

إن الشعور الأولي لانسياب الزمن يجعلنا قادرين على ترتيب انطباعاتنا وعلى الحكم فيما إذا كان حادث قد وقع قبل حادث آخر أو بعده . لكننا كي يمكن أن نقول إن الفاصل الزمني بين الحادثين يساوي عشر ثوان نحتاج لميقاتية . إن أية ظاهرة فيزيائية يمكن أن تخدمنا كميقاتية ، شرط أن تتكرر عدد المرات الذي نريد . وباتخاذ الفاصل الزمني بين بدء حادث من هذا القبيل وانتهائه عند بدء تكراره التالي يمكن أن نقيس فواصل زمنية بتكرر هذه العملية الفيزيائية . وإن كل الميقاتيات ، من الميقاتيات الرملية إلى أدق الأجهزة الحديثة ، تستند على هذه الفكرة . ففي الرملية تكون واحدة الزمن هي الفترة التي يستغرقها الرمل للنزول من الحجيرة العليا إلى الحجيرة السفلى ؛ وتتواصل هذه العملية الفيزيائية بقلب الجهاز .

لنفترض أننا إزاء ميقاتيتين جيدتين تشيران إلى زمن واحد بالضبط وتقع إحداهما على مسافة من الأولى . إن صحة القول بتطابق تأشيراتهما يجب أن تبقى قائمة بصورة مستقلة عن العناية التي نبديها للتحقق منها . ولكن ماذا يعني ذلك بالضبط ؟أي كيف يمكن أن نتأكد من أن الميقاتيتين المتباعدتين تشيران إلى الزمن نفسه تماماً ؟ يمكن أن نفعل ذلك بواسطة التلفزيون ؛ وليكن معلوماً أن هذه الواسطة هي مثال فقط وليست جوهرية في محاكمتنا . يمكن أن أجلس بجوار إحدى الميقاتيتين وأن أشاهد صورة الأخرى منقولة بالتلفزيون . وبذلك يمكن أن أحكم فيما إذا كانتا تشيران معاً إلى زمن واحد أم لا . لكن التواقت بين تأشيرات الأولى وصورة تأشيرات الثانية ليس دليلاً جيداً على

ذلك ؛ لأن الصورة التلفزيونية منقولة على أمواج كهرطيسية بسرعة الضوء . فأنا ، في جهاز التلفزيون أرى صورة كانت قد أرسلت قبل فترة زمنية قصيرة جداً بينما الميقاتية التي إلى جانبي تشير إلى الزمن الحاضر فعلاً . يمكن أن نذلل هذه الصعوبة بسهولة . فما علينا سوى أن نقف في نقطة متساوية البعد عن الميقاتيتين وأن نشاهد صورتيهما المنقولتين بالتلفزيون . فإذا توافقت انطلاقا الإشارتين منهما فستصلان إلي في وقت واحد . وعلى هذا نقول : إذا كانت ميقاتيتان ، مرصودتان من منتصف المسافة بينهما ، تشيران إلى زمن واحد فهما صالحتان للدلالة على الزمن في نقطتين متباعدتين .

لقد استخدمنا في الميكانيك ميقاتية واحدة . لكن ذلك ليس بالأمر اليسير ، لأننا نضطر في هذه الحالة لأن نقوم بكل قياساتنا في جوارها . ونحن لدى مشاهدة ميقاتية عن بعد ، بواسطة التلفزيون مثلاً ، يجب أن نتذكر دوماً أن ما نراه الآن قد حدث في الواقع قبل قليل . فنحن لدى قراءة الزمن مضطرون لإجراء تصحيحات تتفاوت ، كبراً وصغراً ، بحسب المسافة التي تفصلنا عن الميقاتية التي نقرأ الزمن عليها .

واضح أنه ليس من السهل الاكتفاء بميقاتية واحدة . ولكن بما أننا نعرف الآن طريقة التأكد من أن ميقاتيتين (أو أكثر) تشيران معاً إلى زمن واحد وتدقان بإيقاع واحد ، فيمكننا تماماً أن نتصور العدد الذي نريد من الميقاتيات في مرجع واحد معلوم . فكل واحدة منها تساعدنا في تعيين زمن الحوادث التي تقع في جوارها المباشر ، وتكون كلها ساكنة بالنسبة لهذا المرجع . إنها ميقاتيات جيدة **ومتزاملة** في الإيقاع ، وهذا يعني أنها كلها تشير إلى الزمن نفسه في وقت واحد .

إن تدبير ميقاتياتنا بهذا الشكل ليس فيه صعوبة خاصة ولاهو بالشيء المدهش . وسنستخدم بعد الآن كثيراً من الميقاتيات المتزاملة ، بدلاً من ميقاتية واحدة . وعندئذٍ يمكننا أن نحكم بسهولة على توافق ، أو عدم توافق ، حادثين مفصولين بمسافة ما في مرجع واحد ؛ فعند نقطة حدوث أحدهما يوجد ميقاتية ؛ وعند نقطة حدوث الآخر يوجد ميقاتية أخرى ، وهاتان الميقاتيتان متزاملتان ، فيكون الحادثان متواقتين إذا كانت كلتا الميقاتيتين تشيران إلى زمن واحد وقت حدوثهما . وهكذا يصبح القول إن أحد الحادثين وقع قبل الآخر ، ذا معنى محدد دقيق . كل هذا يمكن أن يتقرر بواسطة ميقاتيات متزاملة موزعة في مرجع واحد .

كل هذا يتفق مع الفيزياء التقليدية ولاشيء حتى الآن يناقض التحويل التقليدي .

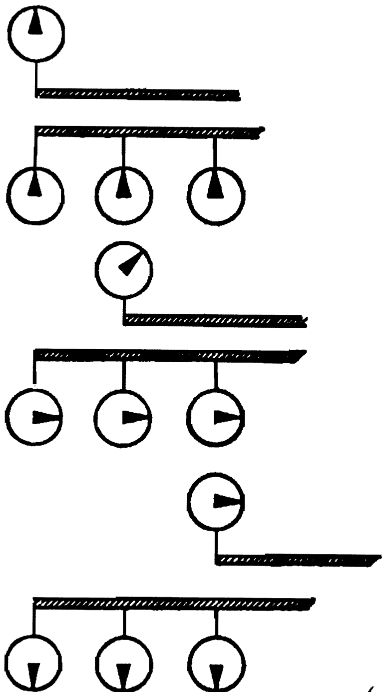
فلتعريف الحوادث المتواقتة نزامل ما بين شتى الميقاتيات بواسطة إشارات . ومن المهم في عملنا أن تنتقل الإشارات بسرعة الضوء ، هذه السرعة التي تلعب دوراً أساسياً في نظرية النسبية .

لكننا نريد معالجة المسألة الهامة لمرجعين متحركين ، واحداً بالنسبة للآخر ، حركة منتظمة ، وفي سبيل ذلك علينا أن نفحص حالة قضيبين مجهزين بميقاتيات . فالراصد المربوط بأحد المرجعين ، المتمثلين بالقضيبين المتحركين أحدهما بالنسبة للآخر ، عنده الآن قضيبه الخاص وسلسلة ميقاتياته المربوطة بالقضيب .

عندما عالجنا مسألة القياسات في الميكانيك التقليدي لم نستخدم سوى ميقاتية واحدة من أجل جميع المراجع . أما هنا فلدينا عدة ميقاتيات في كل مرجع . إن هذا الفرق ليس مهماً ؛ وميقاتية واحدة في كل مرجع تكفي . لكن ليس ما يمنع من استعمال عدة ميقاتيات ، شرط أن تتصرف كلها كميقاتيات جيدة ومتزاملة .

والآن نتناول موضوعنا الأساسي كي نرى أين يتناقض التحويل التقليدي مع نظرية النسبية . ماذا يحدث عندما تتحرك سلسلتان من الميقاتيات بانتظام ، إحداهما بالنسبة للأخرى ؟ إن جواب الفيزيائي التقليدي هو : لاشيء ؛ إنهما ستدقان بإيقاع واحد ويمكن أن نستخدم ميقاتيات متحركة كما نستخدم ميقاتيات ساكنة لقياس الزمن ، والحادثان المتواقتان في أحد المراجع يبدوان متواقتين في أي مرجع آخر .

لكن هذا الجواب ليس الجواب الممكن الوحيد . فهو يستند على الحكم المسبق بأن الميقاتية المتحركة لايختلف إيقاعها عن إيقاع الميقاتية الساكنة . لكن هذا الحكم المسبق قد يكون خاطئاً . ونحن الآن نريد أن نناقش الإمكانية المعاكسة دون أن نقرر ، في الوقت الحاضر ، إذا كانت الميقاتيات المتحركة تغير إيقاعها فعلاً أم لا . فماذا يجب أن نفهم من القول بأن الميقاتية المتحركة يتغير إيقاعها ؟ لنفترض تبسيطاً للشرح ، أنه يوجد ميقاتية واحدة في المرجع العلوي (شكل ٥٦) وعدة ميقاتيات في السفلي . كل الميقاتيات تعمل بآلية واحدة والميقاتيات السفلية متزاملة ، أي أنها تشير كلها معاً إلى زمن واحد . لقد رسمنا ثلاثة مراحل متوالية للمرجعين اللذين يتحرك أحدهما بالنسبة للآخر حركة منتظمة . في المرحلة البدئية رسمنا وضعي عقرب الميقاتية العليا وعقرب الميقاتيات السفلي متماثلين اصطلاحاً ، لأننا دبرنا الأمر كذلك . فكل الميقاتيات تشير إلى زمن واحد . وفي المرحلة الثانية نرى الوضعين النسبيين للمرجعين بعد زمن ما ؛ كل الميقاتيات في المرجع



شكل (٥٦)

السفلي تشير إلى زمن واحد لكن ميقاتية المرجع العلوي لاتحتفظ بإيقاعها ؛ فهو يتغير ويتغير معه الزمن الذي تشير إليه لأنها تتحرك بالنسبة للمرجع السفلي . وفي المرحلة الأخيرة يزداد الفرق ، بين وضعي العقربين السفلي والعلوي ، مع الزمن .

إن الراصد الساكن في المرجع السفلي يجد أن الميقاتية المتحركة يتغير إيقاعها . ونتوصل بالتأكيد إلى النتيجة نفسها لو كانت الميقاتية السفلية تتحرك بالنسبة للراصد العلوي ؛ ففي هذه الحالة كان سيوجد عدة ميقاتيات في المرجع العلوي وميقاتية واحدة في المرجع السفلي . لأن قوانين الطبيعة يجب أن تظل كما هي في المرجعين ، المتحرك أحدهما بالنسبة للآخر .

لقد كان يفترض ضمنياً في الميكانيك التقليدي أن الميقاتية المتحركة لايتغير إيقاعها . فقد كان ذلك يبدو على درجة من البداهة لاترى معها ضرورة لذكره . لكن الحكم المسبق لايجب

الوثوق به مهما كان بدهياً . وإذا أردنا أن نتجنب الزلل فلابد من أن نضع على منضدة التشريح كل الافتراضات الفيزيائية مهما بدت لأول وهلة حقيقة لامراء فيها .

ولايجب أن نظن الخطأ بفرضية لمجرد أنها تختلف عن فرضيات الميكانيك التقليدي . ولنا كامل الحق في أن نتصور أن الميقاتية المتحركة يتغير إيقاعها إذا كان قانون هذا التغير هو هو في كل المراجع العطالية .

ولنأخذ مثالاً آخر : عصا طولها متر واحد ؛ وهذا يعني أن طولها يساوي متراً طالما بقيت ساكنة في مرجع الراصد الذي يقيس طولها . لنفترض أنها تتحرك بانتظام منزلقة على القضيب الذي يمثل هذا المرجع . هل يظل طولها متراً واحداً ؟ يجب أن نعرف قبل كل شيء كيف نقيس طولها . إن طرفيها ، وهي ساكنة ، ينطبقان على تدريجين من القضيب المرجع ، الذي نفرضه مدرجاً ، تفصل بينهما مسافة متر . وبذلك نستنتج : إن طول العصا ، وهي ساكنة ، متر واحد . ولكن ما العمل إذا كانت العصا متحركة ؟ يمكن أن نقيس طولها بالطريقة التالية : في لحظة معينة يأخذ راصدان صورتين متواقتتين ، إحداهما لمبدأ العصا والأخرى لنهايتها . وبما أن الصورتين أخذتا في وقت واحد فإن المسافة بين التدريجين اللذين يقابلان ، على الصورتين ، طرفي العصا هو طولها . وبذلك نكون قد قسنا طول العصا المتحركة بطريقة معقولة تماماً . وهكذا يلزم راصدان مربوطان بالمرجع الذي نقيس الطول منه ، كي يسجلا (بالتصوير هنا) حادثين متواقتين (هما انطباقا طرفي العصا على تدريجين من القضيب لحظة التصوير) يقعان في موضعين مختلفين من مرجع معين . هذا ولايوجد سبب ملزم يجعلنا نعتقد أننا سنحصل على طول يساوي طول العصا الساكنة (اللهم إلا الحكم المسبق) . فبما أن الصورتين أُخذتا متواقتتين ، ونحن نعلم أن التواقت مفهوم نسبي يتعلق بالمرجع ، فمن المعقول جداً أن نحصل في قياس الطول على قيم تختلف باختلاف المرجع الذي نقيسه منه .

وبموجز القول ، لنا كل الحق في أن نتصور أن الميقاتيات يتغير إيقاعها عندما تتحرك وأن **العصا يتغير طولها عندما تتحرك ؛ فالشرط الوحيد الذي تستلزمه هاتان الإمكانيتان هو أن يظل قانونا هذين التغيرين كما هما ، في كل المراجع العطالية .**

إننا لم نناقش سوى بعض الإمكانيات دون أن نذكر أي مبرر لها .

إن سرعة الضوء ، كما نعلم ، هي هي في كل المراجع العطالية . ويستحيل التوفيق بين هذا

الواقع وبين التحويل التقليدي . ولابد من أن تنكسر هذه الحلقة في مكان ما . أليس من الأفضل أن نكسرها هنا ؟ ألا نستطيع أن نفترض تغيرات ، في إيقاع الميقاتية المتحركة وفي طول العصا المتحركة ، تجعل من ثبات سرعة النور نتيجة لهذه التغيرات ؟ الحقيقة أننا نستطيع ذلك . وفي هذه النقطة بالذات يتركز الفرق الأول بين النسبية والفيزياء التقليدية . ويمكن أن نعكس هذا التسلسل فنقول : إذا كانت لسرعة الضوء قيمة واحدة في كل المراجع ، فلابد للميقاتيات من أن يتغير إيقاعها بالحركة ولابد للعصي من أن يتغير طولها بالحركة ولابد من إمكانية تعيين القوانين التي تتحكم في هذين التغييرين .

إن هذه الآراء ليست عجيبة ولاخرقاء . فالفيزياء التقليدية كانت تفترض دوماً أن إيقاع الميقاتية المتحركة لايختلف عن إيقاع الميقاتية الساكنة ، وأن طول العصا المتحركة لايختلف عن طول العصا الساكنة . لكن ، إذا كانت سرعة الضوء هي هي في كل المراجع وكانت نظرية النسبية صحيحة ، فلا خيار لنا سوى التضحية بهذين الافتراضين . إن من الصعب على المرء حقاً أن يتخلى عن الأحكام المسبقة الراسخة في أعماقه ؛ ولكن لايوجد مخرج آخر . إن المفاهيم القديمة تبدو ، من وجهة نظر النسبية ، آراء اعتباطية . وإلا فلماذا نقبل حتى الآن بوجود زمن شامل مطلق ينساب بسرعة واحدة لدى كل الناس في كل المراجع ؟ ولماذا نقبل بأن المسافات لاتتغير بالحركة ؟ فالزمن يقاس بالميقاتيات والإحداثيات تقاس بالمساطر ، وقد تتعلق نتائج هذه القياسات بحالة هذه الأدوات من السكون والحركة . وليس ما يحمل على الاعتقاد بأنها ستتصرف دوماً كما نتمنى . إن الرصد اللامباشر لظواهر الحقل الكهرطيسي يشير إلى أن الحركة تغير إيقاع الميقاتيات وأطوال الأشياء . ويلوح أنه لامناص من تقبل زمن نسبي وطول نسبي خاصين بكل مرجع على حدة . لأنه الوسيلة الوحيدة للخروج من تلك المآزق . والواقع أن النمو اللاحق لهذه الصورة الجديدة لايظهرها وكأنها شر لابد منه ، لأن مزايا هذه النظرية قد فرضت نفسها من تلقاء نفسها .

لقد اجتهدنا الآن في إنارة الطريق الذي يؤدي إلى الافتراضات الأساسية في نظرية النسبية ، وفي تعليل اضطرارنا إلى مراجعة التحويل التقليدي وإلى تعديله بمعالجة الأطوال والزمن (أو ، كما يقول الفلاسفة ، المكان والزمان) بأسلوب جديد . لقد كان هدفنا حتى الآن طرح الأفكار التي تشكل أساساً لإدراك فيزيائي وفلسفي جديد . إن هذه الأفكار بسيطة ، لكنها ، بشكلها الكيفي هنـا ، ليست كافية لاستخلاص نتائج كمية منها . ونعود الآن من جديد إلى استخدام طريقتنا القديمة في شرح الأفكار الرئيسية وفي تقديم أفكار أخرى دون براهين .

ولإلقاء الضوء على الفرق بين نظرة الفيزيائي القديم الذي يعتنق التحويل التقليدي ، والذي نرمز له بـ **ت** ، وبين نظرة الفيزيائي الحديث الذي يعتنق نظرية النسبية الحديثة ، والذي نرمز له بـ **ح** ، نتصور الحوار التالي بينهما :

ت : إنني أعتقد بمبدأ النسبة الغاليلي في الميكانيك ، لأنني أعرف أن قوانين هذا العلم هي هي في مرجعين يتحركان بانتظام واحداً بالنسبة للآخر ، أو بتعبير آخر ، أن هذه القوانين تبقى ثابتة الشكل إذا طبقنا عليها التحويل التقليدي .

ح : لكن مبدأ النسبية يجب أن ينطبق على جميع الظواهر الفيزيائية في عالمنا الخارجي . أي أن قوانين الفيزياء برمتها ، لاقوانين علم الميكانيك فحسب ، يجب أن تكون هي هي في أي مرجعين يتحركان أحدهما بالنسبة للآخر ، حركة منتظمة .

ت : ولكن كيف يمكن أن تكون كل قوانين الطبيعة متطابقة في مرجعين يتحركان بانتظام ، واحداً بالنسبة للآخر ؟ إن قوانين الحقل الكهرطيسي ، أي معادلات مكسويل ، لاتبقى على شكلها عندما نطبق عليها التحويل التقليدي . فهذا واضح ، مثلاً ، في سرعة الضوء . لأن سرعة الضوء ، لايجب أن تكون هي هي في مرجعين يتحركان بانتظام أحدهما بالنسبة للآخر .

ح : إن هذا يثبت فقط عدم وجوب تطبيق التحويل التقليدي ، أي أن الصلة بين المرجعين يجب أن تكون مختلفة عن التحويل التقليدي ؛ وأن علينا ، عندما ننتقل من مرجع لآخر ، أن لانحول الإحداثيات والسرع بالأسلوب المعتمد في قوانين التحويل هذا ؛ بل يجب أن نبدل هذه القوانين بقوانين تحويل جديدة يجب أن نستخلصها من الافتراضات الأساسية في نظرية النسبية . وليس من المهم معرفة الصيغة الرياضية لقوانين التحويل الجديدة ويكفي أن نعرف أنها تختلف عن قوانين التحويل التقليدي ، وأنها معروفة باسم تحويل لورنتز Lorentz ويمكنني أن أثبت لك أن تطبيق تحويل لورنتز على معادلات مكسويل يدع هذه المعادلات بشكلها المعهود الذي تعرفه ، تماماً كما يدع تحويلك التقليدي قوانين الميكانيك على الشكل الذي تعرفه . لنتذكر كيف تظهر المسألة في الفيزياء التقليدية . عندكم قوانين تحويل من أجل الإحداثيات وقوانين تحويل من أجل السرع . لكن قوانين الميكانيك كانت هي هي في مرجعين يتحركان بانتظام ، واحداً بالنسبة للآخر . وعندكم قوانين تحويل من أجل المكان ، كما يقول الفلاسفة . ولكن ليس عندكم قانون تحويل من أجل الزمان ، لأن الزمن ، كما تدعون ، لايختلف من مرجع لآخر . إن الأمر غير ذلك تماماً في نظرية النسبية . فنحن عندنا قانون تحويل من أجل المكان وآخر من أجل الزمان ومنهما نستخلص قانون

تحويل ثالث من أجل السرع . وهي كلها تختلف عن تحويلات الميكانيك التقليدي . ومرة أخرى ، إن قوانين الطبيعة كلها يجب أن تكون هي هي في كل المراجع التي تتحرك بانتظام بعضاً بالنسبة لبعض . فهذه القوانين لاتحتفظ بشكلها ، كما تظن ، عندما نطبق عليها التحويل التقليدي ، بل عندما نطبق عليها تحويل لورنتز . إن قوانين الطبيعة صحيحة في كل المراجع العطالية وإن الانتقال من مرجع لآخر منها يتم بواسطة تحويل لورنتز .

ت : إنني أثق بكلامك ، لكن يهمني أن أعرف الفرق بين التحويل التقليدي وتحويل لورنتز .

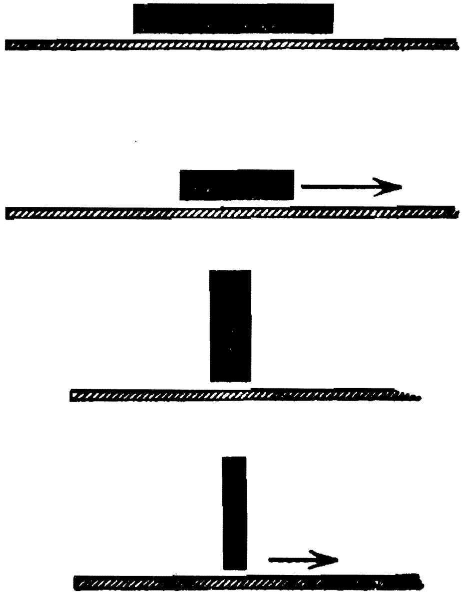
ح : إن خير طريقة للإجابة عن سؤالك هي أن تذكر لي بعض الخصائص المميزة للتحويل التقليدي . وسأحاول أن أشرح لك ما يبقى قائماً منها في تحويل لورنتز وما هو غير قائم ، وفي هذه الحالة الأخيرة أشرح لك كيف يجب أن تتعدل .

ت : إذا وقع حادث في لحظة وفي نقطة من مرجعي ، وكان راصد آخر في مرجع يتحرك بانتظام بالنسبة لمرجعي فإنه سيعلق بمكان الحادث عدداً آخر غير عددي ، ولكن زمن الحادث عنده كما هو عندي . لأننا نستخدم ميقاتيتين من نوع واحد ولاتأثير للحركة على إيقاع الميقاتية . هل هذا صحيح في رأيك أيضاً ؟

ح : كلا ، ليس هذا صحيحاً فيما أعتقد ؛ إن كل مرجع يجب أن يكون مجهزاً بمقاتياته الخاصة الساكنة ، لأن الحركة تغير إيقاعها . فالراصدان المربوطان بمرجعين مختلفين يعلقان عددين مختلفين لابمكان وقوع الحادث فحسب بل وبلحظة وقوعه أيضاً .

ت : هذا يعني أن الزمن لم يعد شاملاً غير متغير ، لكنه ، في التحويل التقليدي ، شامل كما هو لجميع المراجع ، أما في تحويل لورنتز فهو متغير وله تحويله الخاص كما للإحداثي المكاني تحويله الخاص في التحويل التقليدي . وأود أن أعرف إذا كان الأمر كذلك فيما يخص المسافة . فالعصا الصلبة ، في الميكانيك التقليدي وسواء كانت متحركة أو ساكنة ، تحتفظ بطولها . فهل الحال كذلك الآن ؟

ح : كلا . لم تعد الحال كذلك . إذ ينتج من تحويل لورنتز أن العصا المتحركة تتقلص في اتجاه الحركة ، وأن هذا التقلص يستفحل لدى تزايد سرعتها ، فتصبح أقصر فأقصر . لكن هذا التقلص لايحدث إلا في اتجاه الحركة . فأنت ترى على الرسم (شكل ٥٧) عصا متقلصة إلى



شكل (٥٧)

نصف طولها لأنها متحركة بسرعة تقارب ٩٠٪ من سرعة الضوء . ولايحدث أي تقلص في منحى عمودي على منحى الحركة كما حاولت أن أوضح في القسمين الأخيرين من الرسم .

ت : هذا يعني أن إيقاع الميقاتية المتحركة وطول العصا المتحركة يتعلقان بالسرعة . لكن كيف ؟

ح : إن التغيرات تستفحل كلما ازدادت السرعة . وينتج من تحويل لورنتز أن طول العصا ينعدم عندما تصل إلى سرعة الضوء ، مهما كانت طويلة قبل أن تتحرك . ومثل ذلك ، يتغير إيقاع الميقـاتية المتحركة ، إذا قيس بإيقاع الميقاتيات التي تمر أمامها والموزعة على استقامة القضيب — المرجع ، فتتباطأ (انظر الشكل ٥٦) ويستفحل هذا التباطؤ إلى أن تتوقف الميقاتية تماماً عندما تبلغ في حركتها سرعة الضوء ، ولو كانت ميقاتية « جيدة » .

ت : إن هذا يبدو مناقضاً لكل ما أعرف . فأنت تعلم ، كما أعلم ، أن السيارة المتحركة لاتتقاصر وهي متحركة ؛ وتعلم أيضاً أن السائق يمكنه أن يقارن ميقاتيته « الجيدة » بالميقاتيات التي يمر أمامها على الطريق ؛ فلا يجد أي فرق . إن كل ذلك يناقض ما تقول .

ح : إن ما تقوله صحيح بلا ريب . لكن السرع الميكانيكية التي تذكرها صغيرة جداً إزاء سرعة النور ؛ ومن السخف أن نطبق ، في هذه الحالات ، نظرية النسبية . فسائق السيارة يستطيع أن يطبق ، بكل ثقة ، قوانين الفيزياء التقليدية حتى ولو ارتفع بسرعة سيارته مئة ألف مرة ؛ لأن الفرق بين التجربة وبين التحويل التقليدي لايصبح محسوساً إلا في السرع القريبة من سرعة الضوء ؛ أي أن صحة تحويل لورنتز لاتتجلى بشكل سافر إلا في السرعات العالية جداً .

ت : ولكن تظهر عندئذٍ صعوبة أخرى . يمكنني ، بموجب الميكانيك التقليدي ، أن أتصور أجساماً تتحرك بأسرع من الضوء . خذ مثلاً جسماً يتحرك بسرعة الضوء بالنسبة للسفينة في اتجاه حركتها بالنسبة للشط ؛ لاشك أن سرعته بالنسبة للشط ستكون أكبر من سرعة النور . فماذا يحدث للعصا التي تتلاشى وهي بسرعة الضوء . وإذا فاقت سرعتها سرعته ، فماذا يجب أن نتوقع بخصوص طولها ؟ هل يصبح سلبيا ؟!

ح : إن تهكمك لامبرر له . لأن نظرية النسبية تقول بأنه لايمكن لأي جسم مادي أن يتحرك بسرعة الضوء . فأنى له أن يتخطاها ؟ إن سرعة الضوء هي حد السرعة الأعلى في الطبيعة . فلو كانت سرعة الجسم بالنسبة للسفينة تساوي سرعة الضوء فإن سرعته بالنسبة للشط تساوي سرعة الضوء أيضاً . أليس هذا أحد الافتراضين الأساسيين في نظرية النسبية ، لدى الانتقال من مرجع لآخر ؟ إن القانون الميكانيكي البسيط الذي يقضي بجمع السرعتين أو بطرحهما لم يعد صحيحاً ، أو بتعبير أدق ، لم يكن سوى قانون تقريبي يختص بالسرعات الصغيرة لابالسرعات القريبة من سرعة الضوء . إن العدد الذي يعبر عن سرعة الضوء وارد بشكل مكشوف في تحويل لورنتز حيث يلعب دوراً من شأنه أن يحول دون تصور سرعة أكبر من سرعة النور ، ويقوم مقام السرعة الحدية اللامتناهية كبراً في الميكانيك التقليدي . إن هذه النظرية الأشمل من نظريتك لاتتعارض مع التحويل التقليدي في الميكانيك التقليدي . فنحن على العكس ، نعود فنجد المفاهيم القديمة كحالات حدية في السرعات الصغيرة . ففي هذه النظرية تتضح المجالات التي يصح فيها الميكانيك التقليدي كما تتضح حدودها . إن تطبيق نظرية النسبية على حركات السيارات والسفن والقطارات سخيف كاستعمال الآلة الحاسبة عندما يكفي استعمال جدول الضرب .

النسبيـة والـميكـانيـك

لقد نشأت نظرية النسبية من الضرورة ، من التناقضات الخطيرة والعميقة التي ظهرت في

النظرية القديمة التي لم تتضمن أي مخرج منها . لكن قوة النظرية الجديدة تكمن في التماسك المنطقي والبساطة اللذين يتجليان في حل هذه الصعوبات كلها انطلاقاً من عدد صغير من الافتراضات المقنعة .

ولئن كانت نظرية النسبية قد نشأت من مسألة الحقل ، إلا أنها ما لبثت أن بسطت سلطانها على كل قوانين الفيزياء . ويبدو أن مشكلة جديدة تبرز هنا . إن قوانين الحقل ليست من نوع قوانين الميكانيك إطلاقاً . إن قوانين الحقل لامتغيرة بالنسبة لتحويل لورنتز بينما قوانين الميكانيك لامتغيرة بالنسبة للتحويل التقليدي . فكيف تدعي إذن نظرية النسبية أن **كل** قوانين الفيزياء لامتغيرة بالنسبة لتحويل لورنتز ؟ للجواب عن هذا السؤال يجب أن نتذكر أن التحويل التقليدي ليس سوى حالة خاصة ، حالة حدية من تحويل لورنتز تحصل عندما تكون السرعة النسبية للمرجعين صغيرة جداً . ينتج من ذلك أن قوانين الميكانيك يجب أن تتحول كي تصبح لامتغيرة بالنسبة لتحويل لورنتز . لأن قوانين الميكانيك بشكلها القديم تصبح فاسدة عندما تقترب السرع من سرعة الضوء . لايمكن أن يوجد سوى تحويل واحد للانتقال من مرجع لآخر ، وهو تحويل لورنتز .

لقد كان سهلاً تحويل الميكانيك التقليدي بحيث يصبح خالياً من التناقض ، لا مع نظرية النسبية فحسب ولكن أيضاً مع وفرة النتائج التجريبية التي كان يفسرها بشكله القديم . إن الشكل القديم صالح من أجل سرع صغيرة ، فيجب أن يكون حالة حدية من شكله الجديد . وقد يكون من المفيد أن نسوق مثالاً على تغير أدخلته نظرية النسبية على الميكانيك التقليدي . فقد يقودنا هذا إلى نتائج يمكن أن توضع على محك التجربة فتؤكدها أو تنفيها .

لنفترض جسماً ذا كتلة معينة ومتحركاً على خط مستقيم وخاضعاً لقوة خارجية في اتجاه الحركة . إن القوة ، كما نعلم ، متناسبة مع تغير السرعة . ولكي نكون أكثر وضوحاً نقول : إن تناسب القوة مع تغير السرعة يعني أنه إذا كانت القوة ثابتة وتزيد في سرعة الجسم من ١٠٠ إلى ١٠١ متراً في الثانية فإنها تستغرق ثانية واحدة أيضاً كي تزيد سرعته من ١٠٠٠ إلى ١٠٠١ متراً في الثانية ، ومن ٢٩٠٠٠٠ كيلومتر في الساعة (٢٩٠٠٠٠٠ كم / ساعة + ١ متر / ثانية) . أي أن القوة المؤثرة في جسم معين ، والتي تولد تغيراً في السرعة ثابتاً خلال فترات زمنية متساوية ، هي قوة ثابتة الشدة .

هل يظل هذا القانون صحيحاً في نظرية النسبية ؟ كلا . إن هذا القانون صحيح فقط في

السرعات الصغيرة . ما هو إذن ، بموجب نظرية النسبية ، قانون السرعات الكبيرة ، القريبة من سرعة الضوء ؟ إنه التالي : إذا كانت سرعة الجسم المادي كبيرة ، يلزم قوى هائلة الشدة لزيادة سرعته . إن العناء البسيط الذي تلقاه في زيادة السرعة متراً واحداً في الثانية بدءاً من ١٠٠ متر / ثانية ، لايقارن بالمجهود الكبير الذي نعانيه عندما نريد زيادة السرعة متراً واحداً أيضاً بدءاً من سرعة قريبة من سرعة الضوء . فكلما اقتربت سرعةالجسم من سرعة الضوء ازدادت الصعوبة في زيادتها . وعندما تبلغ سرعته سرعة الضوء يصبح من المستحيل أن نزيد فيها . ذلك هو الفرق الكبير الذي تجلبه نظرية النسبية ، إن سرعة الضوء حد أعلى لايمكن تجاوزه . ولايوجد أية قوة محدودة ، ولو كانت كبيرة جداً ، قادرة على توليد سرعة أكبر من سرعة الضوء . ففي مكان قانون الميكانيك القديم ، الذي يربط ما بين القوة وتغير السرعة ، يظهر قانون جديد أكثر تعقيداً . فالميكانيك التقليدي بسيط من وجهة نظرنا الجديدة لأن كل ملاحظاتنا الشائعة تقريباً لاتتناول سوى سرع أصغر بكثير من سرعة الضوء .

إن للجسم الساكن كتلة معينة ، تسمى **الكتلة السكونية** . وقد تعلمنا ، في علم الميكانيك ، أن كل جسم يقاوم تغيير حركته ، ومقاومته هذه تشتد كلما كانت كتلته كبيرة ، وتضعف كلما كانت كتلته صغيرة . على أن لدينا في نظرية النسبية شيئاً آخر . فمقاومة الجسم لزيادة سرعته لاتشتد بسبب عظم كتلته السكونية فقط ، بل وبسبب عظم سرعته أيضاً . أي أن الأجسام المتحركة بسرع قريبة من سرعة الضوء تبدي مقاومة شديدة جداً تجاه القوى الخارجية . أما في الميكانيك التقليدي فقد كانت مقاومة الجسم لتغيير حركته شيئاً لايتوقف إلا على كتلته السكونية . أما في نظرية النسبية فإن هذه المقاومة تتوقف أيضاً على سرعة الجسم ــ بالإضافة إلى كتلته السكونية ــ فتشتد جداً حتى تصبح لامتناهية في الكبر عندما يبلغ الجسم سرعة تكاد تساوي سرعة النور .

إن النتائج التي أتينا على شرحها تتيح لنا فرصة أن نضع نظرية النسبية على محك التجربة . هل القذائف المتحركة بسرع قريبة من سرعة النور تقاوم ، فعلاً ، القوى الخارجية بالشدة التي تتنبأ بها النظرية ؟ ولما كانت نصوص نظرية النسبية ، من هذه الناحية ، قوانين كمية فإننا نستطيع نبذها أو اعتناقها إذا أمكن إطلاق قذائف تقترب سرعتها من سرعة الضوء .

إن من حسن حظنا أن الطبيعة تضع تحت تصرفنا قذائف من هذا القبيل . إن ذرات المواد المشعة ، كالراديوم مثلاً ، تتصرف كمدافع تطلق قذائف بسرعات هائلة . ودون الدخول في

تفاصيل هذا الموضوع ، نكتفي بذكر وقائع هامة جداً في الفيزياء والكيمياء الحديثتين . إن كل المواد في هذا العالم تتألف من عدد صغير من **الجسيمات العنصرية** . ويمكن أن نشبه هذا بمدينة نرى فيها عمارات متفاوتة في الكبر وفي الشكل ؛ لكن بناءها كلها ، من أبسطها إلى أضخمها ، قد شيد من عدد قليل من أجناس اللبنات . وكذا الأمر في أشياء عالمنا المادية : من الهدروجين ، أبسطها وأخفها إلى الأورانيوم ، أثقلها ؛ كلها مصنوعة من أجناس قليلة من الجسيمات العنصرية . والعناصر المثقلة جداً (كالأورانيوم وغيره كثير) بعدد كبير من الجسيمات العنصرية المصرورة معاً هي عناصر قلقة التماسك تنزع إلى التفكك أو ، كما يقال ، تكون ذات **نشاط إشعاعي** ، أي أنها تقذف ، بين الفينة والفينة ، بعضاً من « اللبنات » ، الجسيمات ، بسرعة قريبة من سرعة النور . فالذرة من معدن الراديوم ، مثلاً ، تتكون ، بموجب معلوماتنا الحالية المدعومة بتجارب عديدة ، من بنية معقدة (ما تزال هندستها مجهولة) ؛ ونشاطها الإشعاعي خير دليل على أنها تتركب فعلاً من جسيمات أكثر بساطة ، هي التي يسميها الفيزيائيون **الجسيمات العنصرية أو الأولية**[1] .

لقد أمكن ، بتجارب معقدة وذكية ، دراسة مقاومة هذه الجسيمات ضد القوى الخارجية التي تروم تسريعها . وقد أثبتت تلك التجارب ، بما لايقبل أي شك ، أن هذه المقاومة تشتد فعلاً بازدياد السرعة وفق القانون الذي تتنبأ به نظرية النسبية . وهكذا ومرة أخرى تتجلى أمامنا الإنجازات الخلاقة في العلم : تنبؤ النظرية ببعض الوقائع والتيقن من هذه الوقائع بالتجربة .

إن هذه النتائج توحي بتعميم هام : إن الجسم الساكن يمتلك كتلة ؛ لكنه لايمتلك طاقة حركية . لكن الجسم المتحرك يملك كتلة ويتمتع بطاقة حركية ؛ وهو يقاوم التسريع بأشد مما يفعل الجسم الساكن . فكأن الطاقة الحركية للجسم المتحرك هي التي تزيد في مقاومته للتسريع . فإذا كان لجسمين كتلتان سكونيتان متساويتان ، فإن الجسم الذي يملك طاقة حركية يقاوم تأثير القوى الخارجية بأشد مما يفعل الجسم الساكن .

لنتصور الآن علبة كبيرة تحوي عدداً من الدحل ، وأن هذه المجموعة كلها ساكنة في مرجعنا . إن تحريكها ، أي تسريعها ، يتطلب تسليط قوة عليها . ولنطرح السؤال التالي : هل القوة الفاعلة في العلبة بما فيها تزيد في سرعتها زيادة معينة واحدة سواء كانت الدحل ساكنة في العلبة أم

---

(١) يبدو اليوم أن هذه الجسيمات ليست على الدرجة من البساطة التي كان المؤلفان يتصورانها ، وإن لم يمكن حتى الآن تفتيتها إلى جسيمات أكثر « عنصرية » (المترجم) .

متحركة في كل الاتجاهات ، كذرات الغاز ، بسرعة وسطية قريبة من سرعة الضوء ؟ من الواضح أن قوة أكبر تلزم في حالة كون الدحل متحركة ، وذلك بسبب الطاقة الحركية الكبيرة التي تملكها الدحل والتي تؤدي إلى اشتداد مقاومة العلبة . فالطاقة ، الحركية على الأقل ، تقاوم الحركة كما تقاومها الكتل الوازنة . ولكن هل ينسحب هذا القول على كل أنواع الطاقة ؟

إن نظرية النسبية تستنتج ، من فرضيتها الأساسية ، جواباً واضحاً ومقنعاً عن هذا السؤال ؛ وهو أيضاً جواب كمي : إن كل طاقة تقاوم تغيير الحركة ؛ إن كل طاقة تتصرف تصرف المادة ؛ إن قطعة الحديد يزداد وزنها عندما نسخنها لأنها تكتسب طاقة حرارية ؛ إن أشعة الشمس المنتشرة في الفضاء تتمتع بكتلة لأنها تمتلك طاقة إشعاعية ؛ وعلى هذا فإن الشمس ، وكل نجوم الكون ، تفقد من كتلتها بالإشعاع . إن هذه النتيجة الهامة ، ذات الشمول التام ، إنجاز عظيم من إنجازات نظرية النسبية لايشذ عنه أي واقع يقع .

كانت الفيزياء التقليدية ، في أواخر القرن الماضي ، تتضمن هيولتين : المادة والطاقة ؛ أولاهما فقط ذات وزن ؛ أما الثانية فعديمة الوزن . وكان فيها قانونان في الانحفاظ ، كلاً على حدة : انحفاظ المادة وانحفاظ الطاقة . لكن الفيزياء الحديثة لاتعترف بالفصل بين المادة والطاقة ولا بكل قانون انحفاظ على حدة ؛ لأن نظرية النسبية لاتميز بين هاتين الهيولتين ، المادة والطاقة ، تمييزاً جوهرياً ، وبدلاً من قانوني انحفاظ اثنين ، تقدم قانون انحفاظ واحد هو : انحفاظ « الكتلة ــ الطاقة » . لقد تكشف هذا الإنجاز الرائع عن خصوبة عظيمة قلّ أن نجد لها مثيلاً في علم الفيزياء كله .

إن للطاقة كتلة . إن الكتلة طاقة مكثفة ملموسة . ولكن كيف خفي هذا الأمر على عباقرة الأقدمين ؟ هل قطعة الحديد تزن ، وهي ساخنة ، أكثر مما تزن وهي باردة ؟ إن الجواب عن هذا السؤال هو الآن « نعم » وقد كان « لا » في الماضي . إن الصفحات التي تفصل بين هذين الجوابين لاتكفي ، يقيناً ، لتغطية هذا التعارض .

إن العقبة التي حالت دون هذا الاكتشاف لدى الأقدمين هي من شاكلة العقبة التي صادفناها قبل الآن . فهي تكمن في صغر هذا التغير الكتلي النسبوي[1] لدرجة تستعصي على أدق

---

(١) نستخدم ، بعد الآن الصفة « نسبوي » للإشارة إلى نظرية النسبية، لتميزها عن معنى كلمة « نسبي » التي تشير إلى كلمة « نسبة » . (المترجم) .

الموازين وأكثرها حساسية . لكن إثبات أن الطاقة تتمتع بكتلة يتجلى ، بشكل غير مباشر ، في وقائع تجريبية عديدة جد مقنعة .

إن سبب ضآلة الوضوح المباشر هو صغر نسبة الكتلة على الطاقة التي تكافئها . إن وضع الكتلة بالنسبة للطاقة يشبه وضع عملة ذات قيمة شرائية منخفضة جداً بالنسبة لعملة ذات قيمة شرائية عالية جداً . ولتقدير هذه النسبة بوضوح نذكر أن كمية الطاقة اللازمة لتحويل ثلاثين ألف طن من الماء إلى بخار لاتزن أكثر من غرام واحد . فالطاقة كانت ، إذن ودوماً ، تعتبر عديمة الوزن ، وما ذلك إلا لأن الكتلة التي تمثلها ضئيلة جداً .

إن « الطاقة ــ الهيولة » هي إذن الضحية الثانية على مذبح نظرية النسبية . أما الضحية الأولى فقد كانت الوسط الذي تنتشر خلاله الأمواج الضوئية .

إن تأثير نظرية النسبية يمتد إلى أبعد من المسألة الأم . فهي قد ذللت صعوبات نظرية الحقل وأزالت تناقضاتها ؛ وهي تصوغ قوانين ميكانيكية عامة ؛ وتستبدل بقانوني الانحفاظ قانوناً واحداً وتغير النظرة التقليدية للزمن المطلق الشامل ؛ ولايقتصر سلطانها على علم الفيزياء وحده ، بل إنها تشكل إطاراً عاماً يضم شتات كل ظواهر الطبيعة .

المتَّصِل المكاني

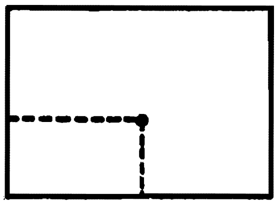
« اندلعت الثورة الفرنسية في باريس يوم ١٤ تموز عام ١٧٨٩ » . إن مكان هذا الحادث وزمانه مذكوران في هذا النص . إن من يسمع هذا القول ولايدري ما تعنيه كلمة « باريس » يمكن أن نعرفه بها بقولنا : إنها مدينة على الكرة الأرضية تقع على الدرجة ٢ من خط الطول شرقاً وعلى الدرجة ٤٩ من خط العرض شمالاً . إن هذين العددين يشيران إلى مكان وقوع الحادث ، وجملة « ١٤ تموز عام ١٧٨٩ » تشير إلى زمان وقوع الحادث . وفي الفيزياء ، أكثر من التاريخ ، يكتسي ذكر مكان وزمان وقوع الحادث أهمية كبيرة لأن هذين الكائنين يشكلان أساس التوصيف الكمي .

ونحن ، لأسباب تبسيطية ، لم نهتم حتى الآن إلا بالحركة على خط مستقيم . وكان مرجعنا قضيباً صلباً له مبدأ ولكن ليس له نهاية . لنحتفظ بهذا التحديد ، ولنعتبر عدة نقاط من القضيب .

إن موضع كل نقطة من هذه النقاط يتعين بعدد وحيد ، يسمى إحداثي النقطة . فالقول إن إحداثي نقطة هو ٢٥١٦ متراً يعني أن بعدها عن مبدأ القضيب يساوي ٢٥١٦ متراً . كما أنه ، على

العكس من ذلك ، إذا أعطيت عدداً وواحدة قياس يمكنني أن أجد نقطة من القضيب تقابل هذا العدد . فنقول : إن نقطة معينة من القضيب تتعلق بكل عدد وإن عدداً معيناً يتعلق بكل نقطة . ويعبر الرياضيون عن هذا الواقع بقولهم : إن نقاط القضيب تؤلف بمجملها **متصلاً وحيد البعد** . **وعند أية نقطة من المتصل يوجد نقطة مجاورة لها جواراً قريباً جداً بقدر ما نريد** . وهكذا فإن نصل ما بين نقطتين متباعدتين من المتصل بعدد من الخطوات الصغيرة بقدر ما نريد . وهكذا فإن الصغر الاختياري للخطوات التي توصل من نقطة لأخرى هو صفة مميزة للمتصل .

لنضرب مثلاً آخر . نأخذ مستوياً ، أو إذا شئتم شيئاً ملموساً كطاولة مستطيلة الشكل . إن موضع أية نقطة من وجه هذه الطاولة يتعين بعددين ، لا بعدد واحد ، خلافاً للحالة السابقة . وهذان العددان هما بعدا النقطة عن حرفين متعامدين من الطاولة كما في الشكل ٥٨ . وهكذا



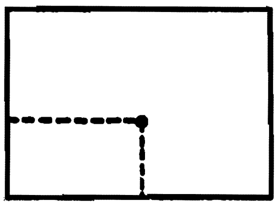
شكل (٥٨)

لايتعلق بكل نقطة من الطاولة عدد وحيد بل عددان . وعلى العكس ، يتعلق بكل مجموعة عددين نقطة واحدة فقط من المستوي ، فنقول إننا إزاء **متصل ذي بعدين** . وعند كل نقطة من هذا المستوي يوجد نقاط تجاورها بأقرب جوار نريد ؛ وإن أية نقطتين متباعدتين منه يمكن أن توصل إحداهما بالأخرى بمنحن يمكن تقسيمه إلى قطع صغيرة بقدر ما نريد . وهكذا فإن صغر الخطوات ، التي توصل من نقطة لأخرى من هذا المتصل الذي تتعين كل نقطة منه بعددين ، هو خاصة مميزة للمتصل ذي البعدين .

لنعرض الآن نموذجاً ثالثاً . لنفترض الآن أنك تريد أن تتخذ غرفتك مرجعاً لك ، إن هذا يعني أنك تريد أن تعين كل المواضع فيها . فموضع المصباح المعلق بالسقف وهو ساكن يمكن أن يتعين بثلاثة أعداد : عددين يعينان بعديه عن جدارين متعامدين وعدد يعين بعده عن أرض الغرفة (أو عن سقفها) كما في الشكل ٥٩ . فبكل نقطة من الفضاء يتعلق ثلاثة أعداد ؛ وبكل مجموعة ثلاثة أعداد تتعلق نقطة من الفضاء : إننا إزاء **متصل ثلاثي الأبعاد** . وعند كل نقطة من هذا

العكس من ذلك ، إذا أعطيت عدداً وواحدة قياس يمكنني أن أجد نقطة من القضيب تقابل هذا العدد . فنقول : إن نقطة معينة من القضيب تتعلق بكل عدد وإن عدداً معيناً يتعلق بكل نقطة . ويعبر الرياضيون عن هذا الواقع بقولهم : إن نقاط القضيب تؤلف بمجملها **متصلاً وحيد البعد** . وعند **أية نقطة من المتصل يوجد نقطة مجاورة لها جواراً قريباً جداً بقدر ما نريد** . وهكذا فإن نصل ما بين نقطتين متباعدتين من المتصل بعدد من الخطوات الصغيرة بقدر ما نريد . وهكذا فإن الصغر الاختياري للخطوات التي توصل من نقطة لأخرى هو صفة مميزة للمتصل .

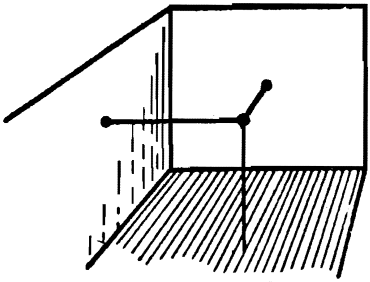
لنضرب مثلاً آخر . نأخذ مستوياً ، أو إذا شئتم شيئاً ملموساً كطاولة مستطيلة الشكل . إن موضع أية نقطة من وجه هذه الطاولة يتعين بعددين ، لا بعدد واحد ، خلافاً للحالة السابقة . وهذان العددان هما بعدا النقطة عن حرفين متعامدين من الطاولة كما في الشكل ٥٨ . وهكذا



شكل (٥٨)

لايتعلق بكل نقطة من الطاولة عدد وحيد بل عددان . وعلى العكس ، يتعلق بكل مجموعة عددين نقطة واحدة فقط من المستوي ، فنقول إننا إزاء **متصل ذي بعدين** . وعند كل نقطة من هذا المستوي يوجد نقاط تجاورها بأقرب جوار نريد ؛ وإن أية نقطتين متباعدتين منه يمكن أن توصل إحداهما بالأخرى بمنحن يمكن تقسيمه إلى قطع صغيرة بقدر ما نريد . وهكذا فإن صغر الخطوات ، التي توصل من نقطة لأخرى من هذا المتصل الذي تتعين كل نقطة منه بعددين ، هو خاصة مميزة للمتصل ذي البعدين .

لنعرض الآن نموذجاً ثالثاً . لنفترض الآن أنك تريد أن تتخذ غرفتك مرجعاً لك ، إن هذا يعني أنك تريد أن تعين كل المواضع فيها . فموضع المصباح المعلق بالسقف وهو ساكن يمكن أن يتعين بثلاثة أعداد : عددين يعينان بعديه عن جدارين متعامدين وعدد يعين بعده عن أرض الغرفة (أو عن سقفها) كما في الشكل ٥٩ . فبكل نقطة من الفضاء يتعلق ثلاثة أعداد ؛ وبكل مجموعة ثلاثة أعداد تتعلق نقطة من الفضاء : إننا إزاء **متصل ثلاثي الأبعاد** . وعند كل نقطة من هذا



شكل (٥٩)

المتصل يوجد نقاط تجاورها بأقرب جوار نريد . ومن جديد نرى أن الصغر الاختياري للخطوات ، التي توصل من نقطة لأخرى من هذا المتصل الذي تتعين كل نقطة منه بمجموعة ثلاثة أعداد ، هو خاصة مميزة للمتصل الثلاثي الأبعاد .

لكن كل هذا ليس من الفيزياء في شيء إلا قليلاً . وللدخول إلى قلب الفيزياء يجب أن نتصور حركة جسيمات مادية . فلرصد حادث من الحوادث التي تقع في الطبيعة وللتنبؤ به لابد من أن نهتم ، لا بمكان هذا الحادث فحسب ، بل وبزمن حدوثه أيضاً . ولنتأمل في مثال بسيط .

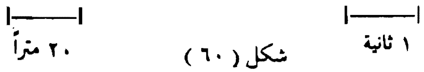
نترك ، من برج ارتفاعه ٨٠ متراً ، حصاة صغيرة تسقط ونعتبرها جسيماً . إننا ، منذ عصر غاليله ، قادرون على أن نحسب سلفاً إحداثي الحصاة الشاقولي في أية لحظة بعد لحظة انطلاق حركة السقوط . وإليك البرنامج الزمني الذي يصف مواضع الحصاة ثانية بعد ثانية حتى نهاية الثانية الرابعة :

الزمن بالثواني	الارتفاع بالأمتار
٠	٨٠
١	٧٥
٢	٦٠
٣	٣٥
٤	٠

وبذا نسجل خمسة حوادث في البرنامج ، كل حادث منه يتمثل بعددين : الإحداثي الزماني والإحداثي المكاني . الحادث الأول هو بدء سقوط الحصاة ، في اللحظة صفر ومن علو ٨٠ متراً . الحادث الثاني هو مرور الحصاة أمام التدريج ٧٥ متراً من القضيب المدرج الشاقولي الذي تسقط

الحصاة على طوله ، وذلك في نهاية الثانية الأولى (وقد نقول انطباق الحصاة على التدريج ٧٥) أما الحادث الأخير فهو وصول الحصاة إلى الأرض (وقد نقول انطباق الحصاة على الأرض) .

يمكن أن نمثل بأسلوب آخر هذا البرنامج المكاني ـــ الزماني ، وذلك بأن نمثل كل زوج مكاني زماني منه بنقطة من مستو . لنتفق أولاً على سلَّم قياس . ولتكن القطعة المستقيمة اليمنى من الشكل ٦٠ ممثلة لثانية زمنية واحدة والقطعة اليسرى ممثلة لـ ٢٠ متراً .



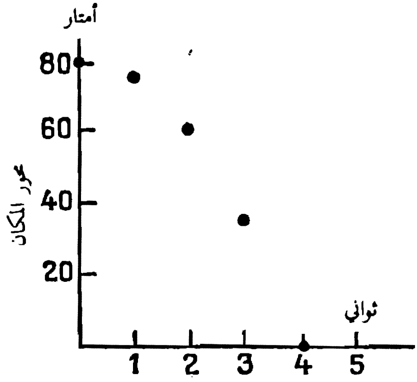
شكل (٦٠)

عندئذٍ نرسم مستقيمين متعامدين ، أحدهما أفقي وندعوه محور الزمن والآخر شاقولي ونسميه محور المكان . ونرى فوراً أن برنامجنا يتمثل ، في هذا المستوي بخمس نقاط (شكل ٦١) . فأبعاد النقـاط عن محور المكـان تمثل الإحداثيات الزمنية المسجلة في العمود الأيمن من البرنامج ؛ وأبعاد النقاط عن محور الزمن تمثل الإحداثيات المكانية للحوادث الخمسة .

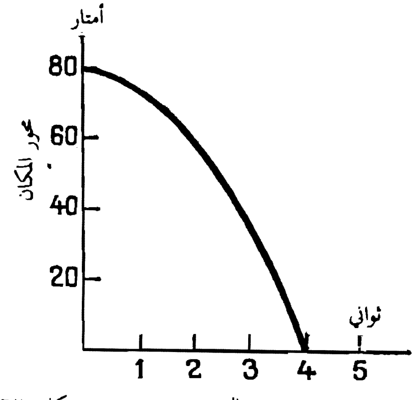
إن هذا المخطط يمثل والبرنامج السابق شيئاً واحداً . فإذا علمنا أياً منهما أمكننا معرفة الآخر . وإن تفضيل أحدهما على الآخر هو مسألة مزاج لأنهما في الواقع متكافئان .

إلى خطوة أخرى الآن . لنتصور برنامجاً أكثر دقة ترد فيه الأوضاع ، لا كل ثانية ، ولكن كل جزء من مئة أو من ألف من الثانية ، سنحصل عندئذٍ على عدد كبير من النقاط في مخططنا المكـاني ـــ الزمـاني . فإذا كان الوضع معينـاً في كل لحظـة ، أو كما يقول الرياضيون : إذا كان الإحداثي المكاني تابعاً للزمن ، فسنحصل على سلسلة من النقاط تشكل خطاً منحنياً مستمراً . فالمخطط المرسوم في (الشكل ٦٢) لم يعد يمثل ، كما في السابق ، معرفة مرحلية متقطعة ، بل معرفة كاملة للحركة برمتها .

إن الحركة على طول القضيب المدرج الصـلب (البرج) ، أي الحركة في متصل مكاني وحيد البعد ، تتمثل هنا بمنحن في متصـل مكاني ـــ زماني ذي بعدين . فكل نقطة من متصل المكـان ـــ الزمان هذا تتعلق بمجموعة عددين ، أحدهما يدل على الإحداثي الزماني والآخر على الإحداثي المكاني . وبالمقابل فإن كل نقطة معينة من مستوي المكان ـــ الزمان يتعلق بها مجموعة



شكل (٦١)



شكل (٦٢)

عددين يتميز بها الحادث . وبنقطتين متجاورتين من هذا المتصل يتعلق حادثان في مكانين متجاورين وفي لحظتين تفصل بينهما فترة زمنية قصيرة .

هذا وقد يحتج امرؤ ضد هذا التمثيل بالقول التالي : إن تمثيل واحدة الزمن بقطعة مستقيمة ثم تركيبها آلياً مع المسافة المكانية لتشكيل متصل ذي بعدين من متصلين وحيدي البعد أمر غير ذي معنى واضح . وللرد على هذا الاحتجاج نقول له : يمكنك أيضاً ، وسواءً بسواء ، أن تحتج ضد كل المخططات البيانية التي من هذا القبيل ، كالمخطط البياني الذي يمثل تغيرات درجة الحرارة في دمشق خلال الصيف الماضي يوماً بعد يوم ، أو كالمخطط البياني الذي يمثل ارتفاع تكاليف المعيشة

في السنين الماضية الأخيرة سنةً بعد سنة ؛ إن كل هذه المخططات البيانية تستقي من منبع واحد ؛ ففي مخطط درجات الحرارة نركب المتصل الحراري ذا البعد الواحد مع المتصل الزمني ذي البعد الواحد لنحصل على متصل حراري ـــ زماني ذي بعدين .

لنعد الآن إلى جسيمنا الذي نتركه يسقط من قمة البرج على ارتفاع ٨٠ متراً . إن تمثيلنا البياني اصطلاح مفيد ، لأنه يعين وضع الجسيم في أية لحظة . ولما أصبحنا بذلك نعلم كيف يتحرك الجسيم نود تمثيل هذه الحركة مرة أخرى ويمكن أن نفعل ذلك بطريقتين مختلفتين .

ما زلنا نتذكر تمثيل الجسيم الذي يغير موضعه ، بمرور الزمن ، في فضاء وحيد البعد ؛ أي أننا مثلنا الحركة كتتابع حوادث في متصل مكاني وحيد البعد . فنحن لم نجمع المكان والزمان معاً وإنما استخدمنا تمثيلاً **حركياً فيه تتغير** الأوضاع مع الزمن .

لكننا استطعنا تمثيل الحركة ذاتها بأسلوب آخر . تمكنّا من أن نعطي تمثيلاً **سكونياً** وذلك باعتماد المنحني في متصل مكاني ـــ زماني ذي بعدين . فالحركة أصبحت بهذا تتمثل كشيء **كائن** ، شيء موجود في متصل مكاني ـــ زماني ولم تعد الحركة شيئاً متحركاً في مكان وحيد البعد .

إن هذين التمثيلين متكافئان تماماً ، وليس تفضيل أحدهما على الآخر سوى مسألة مزاج واصطلاح .

إن كل ما قلناه بخصوص تمثيلي الحركة ليس من النسبية في شيء . ونستطيع استخدام أي منهما على حد سواء ، بالرغم من أن الفيزياء التقليدية تميل إلى استخدام التمثيل الحركي ، أي توصيف الحركة بسلسلة من الحوادث المتوالية في المكان لا ككائن في المكان ـــ الزمان . لكن نظرية النسبية لها وجهة نظر أخرى . إنها تفضل الصورة السكونية وترى في هذا التمثيل للحركة ، كشيء كائن في المكان ـــ الزمان ، صورة للواقع أيسر استعمالاً وأكثر موضوعية . ونحن سيتحتم علينا أن نجيب عن السؤال التالي : لماذا هذان التمثيلان ، المتكافئان من وجهة النظر التقليدية ، ليسا متكافئين من وجهة النظر النسبوية ؟

سنفهم الجواب إذا عدنا لنتأمل من جديد في مرجعين يتحرك أحدهما بانتظام بالنسبة للآخر .

إن الراصدين المنتميين لهذين المرجعين يعلقان ، بموجب الفيزياء التقليدية ، بحادث معين إحداثيين مكانيين مختلفين ، ولكن زمناً واحداً . ففي حالة الحصاة الساقطة من البرج يتعين انطباق

الجسيم على الأرض ، في المرجع الذي اخترناه ، بالإحداثي المكاني « صفر » وبالإحداثي الزماني « ٤ » . فالحصاة ، بموجب الميكانيك التقليدي ، تبلغ الأرض بعد ٤ ثوان أيضاً في المرجع المتحرك بانتظام بالنسبة للمرجع المختار . لكن الراصد في المرجع المتحرك ينسب الإحداثيات إلى مرجعه فيجد إحداثيات مكانية مختلفة لظاهرة الارتطام بالأرض ، برغم أن الإحداثي الزماني هو هو بالنسبة له ولكل الراصدين المتحركين حركة منتظمة بعضاً بالنسبة لبعض ؛ لأن الفيزياء التقليدية لاتعترف إلا بانسياب زمني « مطلق » لدى كل الراصدين . فالمتصل ذو البعدين ، في كل من هذه المراجع ، يمكن أن يتفكك إلى متصلين وحيدي البعد . فبسبب أن الزمن « مطلق » يكون الانتقال ، من الصورة « السكونية » إلى الصورة « الحركية » للحركة ، ذا معنى موضوعي في الفيزياء التقليدية .

لكننا مقتنعون أنه لايجب عموماً استعمال التحويل التقليدي في الفيزياء ، لأنه لايصلح إلا عملياً في السرع الصغيرة ، لا عندما يتعلق الأمر بحسم مسائل جوهرية في الفيزياء .

فبموجب نظريةالنسبية لايكون للإحداثي الزماني ، لاصطدام الكرة بالأرض ، قيمة واحدة لدى كل الراصدين . فالإحداثي المكاني والإحداثي الزماني يتغيران كلاهما من مرجع لآخر ؛ ويكون التغير الزماني ملحوظاً جيداً إذا كانت السرعة النسبية قريبة من سرعة الضوء . وعلى هذا فليس من الممكن تفكيك المتصل ذي البعدين إلى متصلين وحيدي البعد ، فلا يحق لنا أن نعتبر المكان والزمان منفصلين عندما نعين الإحداثيات المكانية ـــ الزمانية في مرجع آخر . إن تفكيك المتصل ذي البعدين إلى متصلين وحيدي البعد عملية اعتباطية ليس لها أي معنى موضوعي .

إن من السهل أن نعمم كل ما قلناه على حالة حركة غير مستقيمة . ذلك أن علينا أن نتناول هنا أربعة أعداد ، لا اثنين ، كي نصف حوادث الطبيعة . إن فضاءنا الفيزيائي ، كما نحس به عن طريق الأشياء وحركاتها ، ذو ثلاثة أبعاد ، أي أن الموضع الواحد يتعين بثلاثة أعداد . أما العدد الرابع فيعين زمن الحادث . فيتعلق إذن بالحادث الواحد بتمامه أربعة أعداد ؛ وكل مجموعة أربعة أعداد تعين حادثاً بذاته . فعالَم الحوادث هو إذن **متصل رباعي الأبعاد** . وليس في هذا أي شيء غريب . فعالم الحوادث في الفيزياء التقليدية رباعي الأبعاد أيضاً ، كما في نظرية النسبية . لكن الفرق يتجلى هنا أيضاًعندما نتناول مرجعين يتحرك أحدهما بالنسبة للآخر . فلنتذكر المثال الذي درسناه منذ فترة : الغرفة متحركة والراصدان ، الداخلي والخارجي ، يعينان الإحداثيات المكانية ـــ الزمانية للحوادث نفسها . فالفيزيائي التقليدي يفكك المتصل الرباعي الأبعاد إلى متصل مكاني ثلاثي الأبعاد ومتصل زماني وحيد البعد ؛ لأنه لايهتم إلا بالتحويل المكاني لأن زمنه مطلق شامل ؛ فيجد

يسراً كبيراً في تفكيك المتصل الكوني الرباعي الأبعاد إلى مكان وزمان مألوفين . أما الفيزيائي النسبوي فإن الزمان والمكان ، كليهما ، يتغيران متشابكين من مرجع لآخر ، ويعين تحويل لورنتز أوصاف تحويل المتصل المكاني ــ الزماني الرباعي الأبعاد ، برمته ، في عالم ظواهرنا الرباعي الأبعاد .

إن عالم الحوادث يمكن أن يُشرح حركياً في صورة تتغير مع الزمن وتُسقط على خلفية من المكان الثلاثي الأبعاد . كما أنه يمكن أن يُشرح في صورة سكونية تُسقط على خلفية من المتصل الرباعي الأبعاد . والصورتان متكافئتان في الفيزياء التقليدية . لكن الفيزياء النسبوية ترى الصورة السكونية أكثر يسراً وأكثر موضوعية .

ومع ذلك يمكن إذا شئنا ، حتى في نظرية النسبية ، أن نستخدم الصورة الحركية . ولكن يجب أن لاننسى أن التقسيم ، إلى مكان وزمان منفصلين ، ليس ذا معنى موضوعي لأن الزمن ليس « مطلقاً » . أما في الصفحات المقبلة فسنستخدم دوماً الصورة « الحركية » ، لا الصورة « السكونية » ، دون أن ننسى حدودها .

النسبية العامة

ما يزال أمامنا سؤال أساسي لم يجد حتى الآن جواباً : هل يوجد مرجع عطالي ؟ لقد تعلمنا أموراً عن قوانين الطبيعة وعن انحفاظ شكلها في تحويل لورنتز وعن شمولية صحتها لكل من المراجع العطالية المتحركة بانتظام بعضاً بالنسبة لبعض . فنحن لدينا قوانين ، لكننا لم نجد بعد المكان الذي نضعها فيه .

ولكي ندرك تماماً مدى الصعوبة في الإجابة عن هذا السؤال نتحدث مع الفيزيائي التقليدي ونطرح عليه بعض الأسئلة البسيطة .

ــ ما هو المرجع العطالي ؟

ــ إنه مرجع تصدق فيه قوانين الميكانيك . فالجسم المتحرر من أية قوة خارجية يتحرك فيه حركة منتظمة . وهذه هي الخاصية التي بواسطتها نميز بين مرجع عطالي ومرجع لاعطالي .

ــ ولكن عندما تقول إن الجسم حر من أية قوة خارجية ، فماذا تعني هذه العبارة ؟

ــ إنها تعني ، بكل بساطة ، أن الجسم يتحرك حركة منتظمة في مرجع عطالي .

وهنا يمكن أن نعود فنسأل مرة أخرى« ولكن ما هو المرجع العطالي ؟ » فندور ، نحن وإياه ،

في حلقة مفرغة . ويضعف الأمل في الحصول على جواب شاف يختلف عما سمعناه منه . فلنحاول الحصول على معلومات ملموسة بتعديل صيغة السؤال :

ـــ هل المرجع المربوط بالكرة الأرضية مرجع عطالي ؟

ـــ كلا ، لأن قوانين الميكانيك ليست صحيحة تماماً على الأرض . لكن المرجع المربوط بالشمس يمكن أن يتخذ ، في مسائل عديدة ، كمرجع عطالي . بيد أننا عندما نتكلم عن الشمس ، وهي في حالة دوران ، ندرك من جديد أن المرجع المربوط بها لايمكن أن يكون عطالياً بدقة .

ـــ ما هو إذن ، وبنص ملموس ، المرجع العطالي ، وكيف يمكن أن نختار حركته ؟

ـــ إنه ، ببساطة ، وهم مفيد ، وليس لدي أية فكرة عن طريقة صنعه . ولكنني لو استطعت أن أبتعد عن كل الأجسام الموجودة في الطبيعة وأن أتحرر من كل التأثيرات الخارجية ، فإن مرجعي يصبح عندئذٍ عطالياً .

ـــ ولكن ماذا يعني أن تتحرر من كل التأثيرات الخارجية ؟

ـــ أعني أن يصبح مرجعي عطالياً .

وهكذا نجد أنفسنا ، من جديد ، أمام السؤال الأول ذاته والحلقة المفرغة ذاتها . لدينا قوانين ولانعرف المرجع الذي ننسبها إليه ؛ فكل بنائنا الفيزيائي قائم على الرمل .

يمكن أن نتناول هذه الصعوبة نفسها من زاوية أخرى . لنتصور أنه لايوجد في الكون كله سوى جسم واحد نتخذه مرجعاً بالضرورة . يقوم هذا الجسم بحركة دورانية . فقوانين الميكانيك من أجل جسم دوار تختلف ، بموجب الفيزياء التقليدية ، عن القوانين التي تتحكم في جسم ذي حركة لادورانية . فإذا كان مبدأ العطالة صحيحاً في إحدى الحالتين فلايمكن أن يكون صحيحاً في الأخرى . إن كل ذلك مثير للريب جداً . ماذا تعني حركة جسم وحيد في الكون كله ؟ فنحن عندما نقول إن جسماً يتحرك نقصد أن وضعه يتغير بالنسبة لجسم آخر . فلامعنى إذن لكلامنا عن حركة جسم وحيد في العالم . فالميكانيك التقليدي يتعارض هنا تماماً مع الحس الشائع . إن وصفة نيوتن هي : إذا كان مبدأ العطالة صحيحاً في المرجع فإن الجسم يكون في هذا المرجع إما ساكناً وإما متحركاً حركة منتظمة ؛ وإذا لم يكن مبدأ العطالة صحيحاً فإن الجسم متحرك قطعاً بلا انتظام .

وعلى هذا فلكي نقرر أن الجسم متحرك أو ساكن يجب أن نعلم سلفاً إذا كانت كل قوانين الفيزياء صالحة ، أم لا ، في المرجع المعتبر .

لنتأمل الشمس والأرض مثلاً . إن الحركة التي نرصدها ما تزال **نسبية** ، أي أنها يمكن أن تدرس من مرجع مربوط بالأرض أو من مرجع مربوط بالشمس . ومن هنا نعلم أن مزية اكتشافات كوبرنيق تكمن في أنه نقل مرجع هذه الدراسة من الأرض إلى الشمس . ولكن بما أن الحركة نسبية فإن كل المراجع تتساوى في صلاحيتها ولا أفضلية لأي منها على الآخرين .

ومن جديد تتدخل الفيزياء لتغير صورة الحس الشائع . إن المرجع المربوط بالشمس يشبه مرجعاً عطالياً أكثر مما يفعل المرجع المربوط بالأرض . فقوانين الفيزياء أحسن انطباقاً في مرجع كوبرنيق (الشمس) منها في مرجع بطليموس (الأرض) . فاكتشافات كوبرنيق ذات قيمة ثمينة في الفيزياء ، لأنها تبرز الميزة الكبيرة التي يتمتع بها مرجع مربوط بالشمس لدى دراسة حركات الكواكب .

لايوجد عملياً في الفيزياء التقليدية أية حركة منتظمة مطلقة . ولو كنا إزاء مرجعين متحركين ، أحدهما بالنسبة للآخر ، حركة منتظمة فلايوجد أي سبب وجيه يبيح لنا أن نقول« إن هذا المرجع ساكن وذاك متحرك » ؛ ولكن إذا كانت حركة أحدهما كما تُرى من الآخر غير منتظمة ، يوجد عندئذٍ سبب وجيه جداً لأن نقول « إن هذا الجسم يتحرك وذاك ساكن (أو متحرك بانتظام) . » فتكتسب الحركة المطلقة هنا ، وهنا فقط ، معنى محدداً تماماً . وهنا أيضاً تنكشف الهوة التي تفصل الحس الشائع عن الفيزياء التقليدية . ونرى عندئذٍ أن المشكلتين اللتين أتينا على ذكرهما في قضية المرجع العطالي وفي قضية الحركة المطلقة ، تظهران مترابطتين معاً ؛ أي أن الحركة المطلقة لايمكن أن توجد إلا إذا وجد مرجع عطالي تصح فيه كل قوانين الطبيعة .

وهكذا قد يخامر المرء يأس من إيجاد مخرج من هذه المشاكل ، من إيجاد نظرية فيزيائية تتيح اتقاءها .

إن أصل هذه المشاكل يعود إلى وجود قوانين صحيحة في زمرة خاصة **فقط** من المراجع هي زمرة المراجع العطالية . وإمكانية حلها تتوقف على الجواب الذي يعطى عن السؤال التالي : هل يمكن أن نصوغ قوانين الفيزياء بحيث تصبح صالحة في كل المراجع مهما كان نوع حركتها ، منتظمة أم غير منتظمة ؟ إذا أمكن ذلك زالت كل صعوباتنا ؛ سنكون عندئذٍ قادرين على تطبيق قوانين

الطبيعة في أي مرجع نريد . كما أن الصراع ، الذي بدأ عنيفاً بين وجهتي نظر بطليموس وكوبرنيق ، يصبح عديم الغرض . إذ يحق لنا عندئذٍ أن نستخدم أياً من المرجعين سواء بسواء ، لأن القولين ، « الشمس ساكنة والأرض تدور » و « الأرض ساكنة والشمس تدور » ، ينبعان من اصطلاحين مختلفين يعبران عن مرجعين مختلفين .

هل بإمكاننا أن نبني فيزياء نسبوية فعلاً ، صالحة في كل المراجع : فيزياء لامكان فيها للحركة المطلقة بل للحركة النسبية فقط ؟ إن هذا ممكن فعلاً .

إن أمامنا دليل واحد على الأقل ؛ وهو ، على ضعفه ، قادر على أن يقود خطانا إلى بناء فيزياء جديدة . إن الفيزياء النسبوية حقاً يجب أن تصلح في كل المراجع ومن بينها حالة المرجع العطالي الخاصة ، ونحن نعرف سلفاً القوانين الصالحة في المرجع العطالي . فلابد إذن من أن تعود القوانين الشاملة لكل المراجع إلى القوانين التي نعرفها عندما يصبح المرجع عطالياً .

إن مسألة صوغ قوانين فيزيائية صالحة في كل المراجع قد وجدت حلاً في **نظرية النسبية العامة** ، وعلى هذا تدعى نظرية النسبية السالفة ، المقصورة على المراجع العطالية ، باسم **النسبية الخاصة أو المقصورة**[1] . ويجب أن لاتتناقض هاتان النظريتان لأن النظرية العامة يجب أن تتضمن النظرية الخاصة كحالة حدية عندما يصبح المرجع عطالياً . فالمرجع العطالي ، وهو الذي صيغت لأجله قوانين الفيزياء في بدئها ، ليس الآن سوى حالة خاصة حدية ؛ لأن كل المراجع المتحركة على هواها ، بعضاً بالنسبة لبعض ، مراجع مقبولة بعد الآن .

والآن نشرح برنامج نظرية النسبية العامة . ولدى التماس طريقنا للوصول إلى هذه الغاية سنكون مضطرين لأن نكون أقل وضوحاً مما كنا حتى الآن . لأن الصعوبات الجديدة ، التي تعترض طريق العلم في هذا المجال ، تجعل هذه النظرية أكثر فأكثر تجريداً . وسنخوض مغامرات غير متوقعة . لكن غايتنا ما تزال أن نتوصل إلى فهم أحسن للواقع . وسيتم هذا بإضافة حلقات جديدة إلى السلسلة المنطقية التي توصل من النظرية إلى الرصد التجريبي . ولكي نزيح من طريقنا ، الموصل من النظرية إلى التجربة ، كل الافتراضات التافهة والمصطنعة وكي يتسع مجال عمل النظرية باستمرار ليضم وقائع أكثر فأكثر عدداً ، لابد من أن نزيد في طول السلسلة باستمرار . وكلما

---

(١) النسبية الخاصة بالمراجع العطالية ، أو المقصورة على المراجع العطالية .

ازدادت نظرياتنا بساطة وعمقاً ازداد جهازنا الرياضي في المحاكمة تعقيداً . وبذلك يصبح الطريق من النظرية إلى التجربة أكثر طولاً وأكثر تعقيداً . وبذلك نقول ، مهمـا بدا هذا القول غريبـاً : إن الفيزياء الحديثة أبسط من الفيزياء القديمة وبذلك تبدو أشق وأعقد . على أنه كلما ازدادت بساطة صورة العالم الخارجي في أذهاننا ، وكلما ازداد عدد ما تشتمل عليه من وقائع زاد شعورنا اقتناعاً بتناسق بنية العالم .

إن هدفنا الجديد إذن بسيط : بناء فيزياء صالحة في كل المراجع . لكن هذا لن يتم دون أن يجلب لنـا متاعب تضطرنا إلى استخدام تشكيلات رياضية تختلف عما سبق أن استخدمناه في الفيزياء حتى الآن . وبتدقيق أكبر نقتصر على إبراز الصـلة بين تنفيذ هذا البرنامج وبين مسألتين أساسيتين : التثاقل والهندسة .

خـارج الـمصعـد وداخلـه

إن قانون العطالة يعبر عن أول تقدم عظيم في الفيزياء ؛ وربما نستطيع أن نقول إنه بدؤها الفعلي . وقد أمكن الحصول عليه من تجربة مثالية : إن الجسم المتحرك ، بمعزل عن كل احتكاك وعن تأثير أية قوة خارجية ، يستمر في حركته بانتظام على خط مستقيم دون توقف . إن هذا المثال وكثيراً سواه أتاحت لنا الشعور بأهمية التجربة المثالية التي يبنيها الفكر . وسنفحص هنا من جديد بعض التجارب المثالية ، التي ، برغم مظهرها الخارق للعادة ، ستساعدنا على فهم نظرية النسبية العامة بمقدار ما تسمح به طرائقنا البسيطة .

لقد فحصنـا فيما سبق تجارب مثالية على الغرفة المتحركة بانتظام . وسنفحص الآن حالة مصعد في سقوط حر .

لنتصور إذن مصعداً كبيراً في الطابق الأخير من ناطحة سحاب أعلى بكثير من أعلى ناطحة سحاب رأيناها . وفجأة ينقطع الحبل الذي يحمل المصعد ، فيبدأ المصعد حركة سقوط حر . يوجد في المصعد راصد يقوم بتجارب فيزيائية أثناء السقوط . سنتكلم عن هذه التجارب ضاربين صفحاً عن مقاومة الهواء داخل المصعد وخارجه وعن أي احتكاك آخر ، لأننا نفحص تجربة مثالية : يترك الراصد الداخلي منديله وقلمه لشأنيهما حرين داخل المصعد ، فماذا يحدث لهذين الجسمين ؟ إن الراصد الخارجي ، الذي يراقب كل ما يجري داخل المصعد من خلال نافذته ، يرى أن المنديل والقلم يسقطان معاً متصاحبين تماماً ، بتسارع واحد . لنتذكر أن تسارع الجسم الساقط مستقل

تماماً عن كتلته ، وأن هذا الواقع هو الذي كشف عن تساوي الكتلة الثقالية مع الكتلة العطالية[1] . ولنتذكر أيضاً أن تساوي هاتين الكتلتين ، في الجسم الواحد ، كان أمراً طارئاً بالصدفة في عرف الميكانيك التقليدي ولم يك يلعب في بنية هذا العلم أي دور ذي بال ، أما هنا فإن هذا التساوي ، الذي يتجلى في أن كل الأجسام تسقط بتسارع واحد ، أمر جوهري يكمن في أساس محاكاتنا كلها .

لنعد إلى المنديل والقلم المتروكين وشأنيهما في المصعد . إن الراصد الخارجي يراهما ساقطين متصاحبين بتسارع واحد . لكن المصعد ، بجدرانه وأرضيته وسقفه ، يسقط بالتسارع نفسه . وهذا يعني أن المسافة بين الأرضية وبين الجسمين لاتتغير . أي أن الراصد الداخلي يرى الجسمين باقيين في المكان الذي تركهما فيه ؛ فهو إذن يستطيع أن يتجاهل حقل التثاقل لأن مفعوله لايعمل إلا خارج المصعد ، خارج مرجعه . فالراصد الداخلي لايشعر بأية قوة تؤثر على الجسمين داخل المصعد ، فهما ، بسبب ذلك ، ساكنان وكأنهما في مرجع عطالي . كما تحدث أمور غريبة في المصعد . فلو أعطى الراصد الداخلي أحد الجسمين صدمة صغيرة في أي اتجاه يريد ، نحو الأسفل أو نحو الأعلى مثلاً ، لاستمر الجسم في الحركة باتجاه الصدمة في خط مستقيم بانتظام حتى يصطدم بأرضية المصعد أو بسقفه . وبمختصر القول : إن قوانين الميكانيك صالحة لدى الراصد الداخلي ؛ فكل الأجسام تتصرف عنده منسجمة مع مبدأ العطالة . لكن مرجعنا الجديد المربوط بالمصعد في سقوطه الحر يختلف عن المرجع العطالي في نقطة واحدة : إن الجسم الذي يتحرك ، في مرجع عطالي ، بمعزل عن أية قوة خارجية يستمر في حركته المنتظمة إلى ما لانهاية ؛ أي أن المرجع العطالي ، كما يفهم في الفيزياء التقليدية ، غير محدود لا في المكان ولا في الزمان . لكن حالة الراصد داخل المصعد تختلف عن ذلك . فالصفة العطالية لمرجعه محدودة في المكان وفي الزمان ؛ أي أن الجسم المتحرك سيصطدم ، عاجلاً أو آجلاً ، بأحد جوانب المصعد فتتوقف الحركة المنتظمة ؛ كما أن المصعد سيرتطم ، عاجلاً أو آجلاً ، بالأرض فيتحطم بمن فيه . فالمرجع المربوط بالمصعد ليس سوى « نسخة جيب صغيرة » من مرجع عطالي حقيقي .

إن خاصية « المحدودية » المكانية ــ الزمانية لهذا المرجع جوهرية جداً . فلو كان مصعدنا الموهوم يمتد من القطب الشمالي إلى خط الاستواء وتركنا المنديل يسقط فوق القطب الشمالي والقلم

---

(١) راجع ، في الفصل الأول ، فقرة : بقي درب .

فوق خط الاستواء ، لما كان لهما ، في نظر الراصد الخارجي ، تسارع واحد ؛ فلا يكونان ساكنين أحدهما بالنسبة للآخر ؛ وهذا يفسد كل محاكمتنا . أي أن المصعد لايشكل مرجعاً عطالياً إلا إذا كان محدوداً بحيث يمكن للراصد الخارجي أن يفترض أن كل الأجسام ، كما يراها ، تتحرك بتسارع واحد .

فبواسطة هذا التحديد يكتسب المرجع الصغير صفة العطالية بالنسبة للراصد الداخلي . وبذلك استطعنا أن نصنع مرجعاً عطالياً تصلح فيه قوانين الفيزياء كلها رغم محدوديته في المكان وفي الزمان . وإذا تصورنا مرجعاً آخر ، مصعداً آخر ، يتحرك بانتظام بالنسبة للمصعد الساقط حراً فإن المرجعين يكونان عطاليين « موضعيين » : أي محدودين كليهما في المكان وفي الزمان ؛ ولقوانين الفيزياء فيهما شكل واحد بالضبط والتمام . فالانتقال من أحدهما للآخر ، مثلاً ، يتم بتحويل لورنتز .

لنفتش الآن عن طريقة كل من الراصدين ، الداخلي والخارجي ، في وصف ما يحدث في المصعد .

إن الراصد الخارجي يراقب حركة المصعد وحركة الأجسام داخله فيجد أن كل هذه الحركات تتفق مع قانون نيوتن في التثاقل (الجاذبية) . فهو يرى أن الحركات غير منتظمة ، بل متسارعة بسبب فعل حقل الجاذبية (التثاقل) الأرضي .

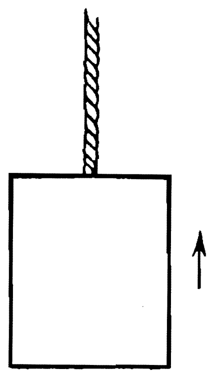
لكن الفيزيائيين الذين يولدون ويعيشون في المصعد يرون غير ذلك بتاتاً . فهم سيعتقدون لاريب أنهم في مرجع عطالي ، وسينسبون كل قوانين الطبيعة إلى مصعدهم ، وسيبررون ذلك بواقع أن هذه القوانين تتخذ ، في مرجعهم ، شكلاً بسيطاً جداً . وبذا يكون من الطبيعي أن يفترضوا أن مصعدهم في حالة سكون وأنه مرجع عطالي .

ونحن يستحيل علينا أن ننحاز إلى أية واحدة من وجهتي النظر المختلفتين لدى الراصدين . فلكل منهما الحق في أن ينسب الحوادث إلى مرجعه المربوط به . وكلا التوصيفين للحوادث هما على درجة واحدة من التماسك .

إن هذا المثال يوضح أن التوصيف المتماسك للظواهر الفيزيائية ممكن في مرجعين ولو كانت حركة أحدهما بالنسبة للآخر غير منتظمة . بيد أننا في هذا التوصيف يجب أن نأخذ بعين الاعتبار تثاقل الجاذبية عندما نقيم « جسراً » يتيح إمكانية الانتقال من مرجع لآخر . إن حقل التثاقل

موجود عند الراصد الخارجي وغير موجود عند الراصد الداخلي . فبالنسبة للراصد الخارجي توجد الحركة المتسارعة للمصعد في حقل الجاذبية التثاقلي ؛ بينما يوجد ، بالنسبة للراصد الداخلي ، سكون ولاوجود لحقل التثاقل عنده . لكن « الجسر » ، وهو حقل الجاذبية التثاقلي الذي يجعل التوصيف ممكناً في المرجعين ، يرتكز على دعامة هامة جداً : هي التكافؤ بين الكتلة الثقالية والكتلة العطالية . وبدون هذا الخيط الموجه ، الذي مرَّ به الميكانيك التقليدي مرور الكرام ، تصبح محاكاتنا كلها مزعزعة .

لنفحص الآن تجربة مثالية تختلف قليلاً عن سابقتها . لنفترض مرجعاً عطالياً ، أي مرجعاً يصح فيه قانون العطالة . لقد أتينا على شرح ما يحدث في مصعد موجود في مثل هذا المرجع . لنغير الآن هذه الصورة ، فنتصور شخصاً خارجياً ربط سقف المصعد بحبل متين وراح يجره بقوة ثابتة الشدة نحو الأعلى ، كما هو موضح في الشكل ٦٣ ، وبوسيلة لاتهمنا معرفتها . بما أن قوانين الميكانيك تنطبق على المصعد فإنه يأخذ بالحركة بتسارع ثابت يتجه باتجاه قوة الجر الثابتة . لنستمع الآن إلى ما يقوله الراصدان ، الداخلي والخارجي ، بخصوص الظواهر التي تحدث في المصعد .

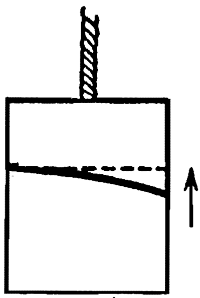


شكل (٦٣)

الراصد الخارجي : إن مرجعي الخاص بي عطالي . المصعد يتحرك بتسارع ثابت تحت تأثير القوة الفاعلة به . إن الراصد الموجود داخل المصعد في حالة حركة مطلقة . وقوانين الميكانيك ليست صحيحة عنده لأنه لايجد أن الأجسام الحرة ، من كل قوة ، في حالة سكون . ولو أنه ترك حجراً في فضاء المصعد فإن الحجر لايلبث أن يصطدم بالأرضية لأن الأرضية تصعد نحوه . إن هذه الظاهرة تحدث بالأسلوب نفسه من أجل منديل وقلم ، أي أنهما يصدمان الأرضية في آن

معاً . ومن الغريب ، كما يبدو لي ، أن الراصد الداخلي لن يستطيع أن ينفصل عن أرضية المصعد . لأنه لو حاول أن يقفز للحق به المصعد فوراً .

الراصد الداخلي : لا أجد سبباً يحملني على الظن بأن مصعدي في حالة حركة مطلقة . وأنا أعترف بأن مرجعي المربوط بالمصعد ليس عطالياً بكل معنى الكلمة ؛ لكني لا أعتقد بأن لهذه الظاهرة أية علاقة بالحركة المطلقة ؛ لأن منديلي وقلمي وكل الأجسام الأخرى عندي تسقط على الأرضية بسبب أنها موجودة في حقل تثاقلي ؛ لأنني لا أرى أي فرق بين حركة السقوط عندي وبين حركة السقوط عند الإنسان الموجود على سطح الأرض . إن حركة السقوط عنده تتفسر ، طبعاً ، بفعل حقل الجاذبية التثاقلي ، وأنا أستطيع أن أعطي لحركة السقوط عندي تفسيراً لايختلف عن تفسيره .



شكل (٦٤)

إن كلا هذين التوصيفين منطقيان جداً ، ولامجال للانحياز لأي منهما . فنحن إذن إزاء ظاهرة واحدة يمكن أن تتفسر بطريقتين حسب المرجع الذي نرصدها منه : فهي إما حركة غير منتظمة دون حقل تثاقلي داخل المصعد ، كما يعتقد الراصد الخارجي ؛ وإما سكون يتسلط عليه حقل تثاقلي داخل المصعد ، كما يعتقد الراصد الداخلي .

إن الراصد الخارجي قد يظن أن المصعد في حالة حركة « مطلقة » غير منتظمة . لكن الحركة التي يمكن أن نوقفها بتسليط حقل تثاقلي لايمكن أن تعتبر حركة مطلقة .

قد نتمكن من إيجاد وسيلة تخرجنا من هذه المثنوية في التفسير وتجعلنا ننحاز إلى أحد التفسيرين . لنفترض أن شعاعاً ضوئياً أفقياً ينفذ إلى داخل المصعد من نافذته ويرد على الجدار

المقابل للنافذة بعد برهة قصيرة جداً . ولنسأل الراصدين كيف **يتوقعان** بالمحاكمة مسار هذا الشعاع داخل المصعد ، فيقولان :

الراصد الخارجي ، وهو الذي يعتقد أن المصعد يتحرك متسارعاً ، يقول : إن الشعاع الضوئي الذي يدخل من النافذة أفقياً سيتحرك في خط مستقيم بسرعة ثابتة نحو الجدار المقابل للنافذة . لكن المصعد يتحرك نحو الأعلى ويعلو مكانه أثناء حركة الضوء نحو الجدار ، وهذا ما سيجعل الشعاع يرد على الجدار في نقطة لاتقع على استقامة دخوله بل تحتها بقليل . صحيح أن هذا الانحراف صغير جداً ولكنه موجود ، وهو الذي سيجعل مسار الشعاع بالنسبة للمصعد ، منحنياً قليلاً ، لامستقيماً . وهذا الفرق ناجم عن المسافة التي يقطعها المصعد أثناء ذهاب الشعاع من النافذة إلى الجدار .

الراصد الداخلي ، وهو الذي يعتقد بوجود حقل جاذبية ثقالي في المصعد يؤثر في كل الأجسام الموجودة فيه ، يقول : إن المصعد ليس بحالة حركة متسارعة لكن فيه حقلاً تثاقلياً . إن الشعاع الضوئي ليس له وزن وهو ، لهذا السبب ، لايتأثر بالحقل التثاقلي . فإذا دخل من النافذة باتجاه أفقي فأتوقع أن يبقى مساره أفقياً وسيرد على الجدار في النقطة المقابلة تماماً لنقطة دخوله .

من مقارنة هذين القولين نستشعر إمكانية للاختيار بين وجهتي النظر المتعاكستين هاتين . فهما تصلان إلى نتيجتين متناقضتين لا إلى نتيجة واحدة . فإذا لم نجد خللاً في أحد هذين القولين على الأقل فلن يكون أمامنا سوى أن نرمي محاكاتنا السالفة الأولى في سلة المهملات . لأننا لانستطيع أن نحتفظ بأسلوبين مختلفين ، أحدهما بحقل تثاقلي والآخر بدونه ، على درجة واحدة من المعقولية ويقودان إلى نتيجتين متناقضتين .

بيد أننا ، لحسن الحظ ، نرى في محاكمة الراصد الداخلي خللاً من شأنه أن ينقذ نتيجتنا السالفة الأولية . إن هذا الخلل موجود في قول الراصد الداخلي « إن الشعاع الضوئي ليس له وزن وهو ، لهذا السبب ، لايتأثر بالحقل التثاقلي » . إن هذا القول لايمكن أن يكون صحيحاً . إن الشعاع الضوئي ينقل طاقة ، وللطاقة كتلة . لكن الكتلة العطالية لابد أن تنجذب بحقل التثاقل لأن الكتلة العطالية والكتلة الثقالية سيان . وعلى هذا فلابد للشعاع الضوئي من أن ينحني في حقل الجاذبية التثاقلي ، تماماً كما يفعل جسم يُقذف أفقياً بسرعة النور . فلو أن الراصد الداخلي فكر جيداً وأخذ بعين الاعتبار وجوب انحناء الشعاع الضوئي في حقل التثاقل لوصل إلى النتيجة التي وصل إليها الراصد الخارجي ، وهي انحناء الشعاع في المصعد الذي يعتبره حاوياً على حقل تثاقلي .

إن حقـل الجاذبيـة الأرضي ، بالطبع ، أضعف من أن نستطيع استغـلاله للتأكد مباشرة بالتجربة من انحناء الأشعة الضوئية فيه ؛ لكن الأرصاد الشهيرة التي تمت أثناء كسوف الشمس ، عام ١٩١٩ ، والكسوفات التي تلته قد أظهرت ، بشكل مقنع وإن كان غير مباشر ، تأثير حقل التثاقل الشمسي على سير الأشعة الضوئية .

ينتج من هذه الأمثلة أن الأمل في بناء فيزياء نسبوية أمل معقول . ولكي يتم ذلك لابد من أن نواجه مسألة التثاقل أولاً .

إن مثال المصعد قد أظهر لنا تماسك التوصيفين : إن الحركة اللامنتظمة يمكن أن تُفترض أو أن لاتفترض . يمكن أن نلغي الحركة « المطلقة » من أمثلتنا بواسطة حقل تثاقلي . وعندئذٍ يمكن أن نقول : لايوجد شيء مطلق في الحركة اللامنتظمة ؛ إن حقل التثاقل يمكن أن يلغيها كلها .

إن شبحي الحركة المطلقة والمرجع العطالي المطلق يمكن أن يُطردا من الفيزياء ؛ فيصبح بناء نظرية جديدة نسبوية ممكناً . وإن تجاربنا المثالية قد أظهرت الصلة الوثيقة بين مسألة النسبية العامة ومسألة التثاقل ، كما أظهرت أن التكافؤ بين الكتلة الثقالية والكتلة العطالية شيء أساسي في هذه الصلة . ومن الواضح أن حل مسألة التثاقل ، في نظرية النسبية ، لابد أن يختلف عن الحل الذي قدمه نيوتن . إن قوانين التثاقل يجب ، ككل قوانين الطبيعة ، أن تصاغ بحيث تكون صالحة في كل المراجع الممكنة ؛ لكن قوانين الميكانيك التقليدي ، كما صاغها نيوتن ، لاتصلح إلا في المراجع العطالية .

الهندسة والتجربة

إن المثال الذي سنفحصه الآن أكثر غرابة من مثال المصعد في السقوط الحر ، إذ علينا الآن أن نواجه مسألة جديدة ؛ مسألة الصلة بين النسبية العامة والهندسة . لنبدأ بفحص العالم الذي تعيش فيه كائنات ذات بعدين . لقد عودتنا الأفلام على رؤية كائنات ذات بعدين تتحرك على شاشة ذات بعدين . لنتصور الآن أن هذه الأشباح ، أي الممثلين ذوي البعدين ، مخلوقات عاقلة يمكنها أن تبني علمها الخاص ، وأن الشاشة ذات البعدين هي كل فضائها الهندسي . إن هذه المخلوقات عاجزة عن أن تتصور ، بشكل ملموس ، فضاء ذا ثلاثة أبعاد ؛ تماماً كما نحن عاجزون عن تصور فضاء ذي أربعة أبعاد . إنهم يعرفون كيف يحيدون عن الخط المستقيم ويعرفون الدائرة ؛ لكنهم عاجزون عن صنع كرة ، مثلاً ، لأن صنع الكرة يستلزم بعداً ثالثاً ، وهم عاجزون عن مغادرة

شاشتهم ذات البعدين . ونحن في عالمنا نعيش وضعاً مماثلاً ؛ فنحن قادرون على الحيود وعلى حني الخطوط والسطوح ، لكننا يصعب علينا جداً أن نتصور فراغاً ، منحرفاً أو منحنياً ، ذا ثلاثة أبعاد .

إن أشباحنا ذات البعدين تستطيع ، عند اللزوم وبواسطة الخبرة والتجربة والتفكير ، أن تكتسب معلومات تامة عن الهندسة الإقليدية ذات البعدين . فهم يستطيعون مثلاً أن يثبتوا أن مجموع زوايا المثلث يساوي ١٨٠ درجة قوسية ، ويستطيعون رسم دائرتين لهما مركز واحد ، فيجدون أن نسبة محيطيهما تساوي نسبة نصفي قطريهما . وإذا كانت الشاشة التي يعيشون فيها لامتناهية الاتساع ، فسيشعرون بأن الذهاب إلى الأمام في خط مستقيم لن يعيد المرء أبداً إلى النقطة التي انطلق منها .

لنتصور الآن أن تغيراً قد طرأ على ظروف حياة هؤلاء المخلوقات ذات البعدين ؛ كأن يأتي شخص من خارج عالمهم المستوي ، من « البعد الثالث » ، ينقلهم جميعاً من الشاشة إلى سطح كرة عظيمة جداً . فلو كانت هذه الكائنات صغيرة جداً بالنسبة لاتساع السطح الكروي الجديد ، ولو كانوا لايملكون وسيلة للاتصال عن بعد ، ولو كانت وسائل مواصلاتهم لاتسمح لهم بالسفر بعيداً ، فإنهم لن يشعروا بتاتاً بأنهم قد انتقلوا إلى عالم مختلف عن دنياهم السابقة . سيجدون أن مجموع زوايا المثلث ما زال يساوي ١٨٠ درجة . وأن نسبة محيطي الدائرتين تساوي نسبة نصفي قطريهما ، وأن الذهاب في خط مستقيم إلى أبعد ما يستطيع المرء منهم لن يعود به إلى نقطة انطلاقه .

ولكن لنفترض الآن أن هذه المخلوقات العاقلة قد طورت مع الزمن وسائلها التجريبية ومعارفها النظرية ؛ فاخترعوا وسائل مواصلات واتصالات تتيح لهم أن يسافروا إلى مسافات بعيدة . إنهم عندئذٍ سيكتشفون أن الذهاب ، بعيداً جداً ، إلى الأمام في خط مستقيم يعود بالمسافر إلى المكان الذي انطلق منه . إن مفهوم « إلى الأمام في خط مستقيم » يعني أن المسافر يسير على محيط دائرة كبرى من الكرة (مركزها مركز الكرة) . وسيكتشفون أيضاً أن نسبة محيطي الدائرتين لاتساوي نسبة نصفي قطريهما إذا كانت إحداهما صغيرة والأخرى كبيرة .

إذا كانت مخلوقاتنا هذه ذات نزعة محافظة ، وإذا كانوا يعلّمون الهندسة الإقليدية في مدارسهم منذ أجيال حينما كانوا لايسافرون بعيداً وحينما كانوا يرون أن هندستهم منسجمة مع أرصادهم ، فإنهم لاشك سيبذلون قصارى جهدهم للتشبث بكل ذلك رغم وضوح القياسات . وربما حاولوا أن يتهموا الفيزياء بمسؤولية هذا الاختلاف . فقد يقولون ، مثلاً ، إن اختلاف درجة الحرارة ، من

مكان لآخر ، يشوه شكل الخطوط فيتولد عن هذا التشوه اختلاف مع الهندسة الإقليدية . لكن سيكتشفون ، عاجلاً أو آجلاً ، سبباً أكثر عقلانية وإقناعاً يفسر هذه الفروق ؛ كأن يتوصلوا إلى معرفة أن عالمهم محدود الاتساع وأنه محكوم بمبادئ هندسية تختلف عما تعلموه . وسيفهمون عندئذٍ ، رغم عجزهم عن تصور الكرة ، أن فضاءهم مصنوع من سطح كروي ذي بعدين . وسيأخذون بعدئذٍ في تعلم مبادئ أخرى في الهندسة يمكن أن تصاغ ، رغم اختلافها عن هندسة إقليدس ، بنصوص لاتقل تماسكاً ولامنطقية عما كانوا يألفون في دنياهم الملموسة ذات البعدين . وسوف تكتسب أجيالهم الجديدة ، عن هندسة الكرة ، معلومات تبدو إزاءها الهندسة الإقليدية العتيقة شيئاً معقداً ومصطنعاً ، لأنها لاتتفق مع الوقائع التجريبية المرصودة .

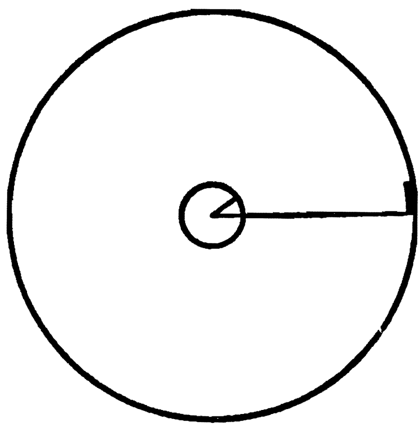
لنعد الآن إلى دنيانا ومخلوقاتها ذات الأبعاد الثلاثة .

ماذا يعني أن فضاءنا الثلاثي الأبعاد ذو صفة إقليدية ؟ إنه يعني أن كل المقولات ، المثبوتة منطقياً في الهندسة الإقليدية ، يمكن أيضاً أن تثبت بالتجربة الفعلية ؛ فنستطيع ، بوساطة أجسام صلبة وأشعة ضوئية ، بناء أشياء تستجيب لمثاليات الهندسة الإقليدية . فحرف المسطرة والشعاع الضوئي يمثلان خطاً مستقيماً ؛ ومجموع زوايا المثلث الذي أضلاعه قضبان مستقيمة يساوي ١٨٠ درجة ؛ ونسبة محيطي دائرتين مصنوعتين من سلكين دقيقين صلبين تساوي نسبة نصفي قطريهما . فالهندسة الإقليدية ، عندما نفهمها بهذا الشكل ، تصبح فصلاً من الفيزياء بسيطاً جداً .

لكن ذلك لايمنعنا من أن نتصور حصول اختلالات في هذه الهندسة ؛ كأن يحدث في مثلث كبير ، مصنوع من قضبان طويلة نظنها شديدة الصلابة ، أن لايكون مجموع زواياه مساوياً ١٨٠ درجة . وبما أننا اعتدنا على تمثيل الأشكال الهندسية الإقليدية بأجسام صلبة ، فسنكون على الأرجح مضطرين إلى الظن بتدخل قوة فيزيائية تتسبب في هذا السلوك الشاذ واللامتوقع للقضبان المستخدمة . وسنحاول معرفة أصل هذه القوة وتأثيرها على ظواهر أخرى . فلإنقاذ الهندسة الإقليدية نبدأ باتهام كفاية صلابة الأشياء ، مما يجعلها غير ممثلة للأشكال الهندسية تمثيلاً محكماً . ثم نجهد في صنع أجسام أصلب ، علها تتصرف بما يرضي الهندسة الإقليدية . لكننا إذا فشلنا في التوفيق بين الهندسة الإقليدية والفيزياء وفي الحصول على صورة بسيطة ومتماسكة ، فلابد لنا عندئذٍ من أن نهجر فكرة أن فضاءنا إقليدي ومن أن نجتهد في الحصول على صورة أكثر انسجاماً مع الواقع ، وذلك بإصدار فرضيات أكثر شمولاً فيما يخص الصفة الهندسية لفضائنا .

إن ضرورة القيام بهذا العمل يمكن أن تتضح من خلال تجربة مثالية تثبت عدم إمكانية بناء فيزياء نسبوية حقاً على أساس من الهندسة الإقليدية . وسنستفيد في محاكمتنا من النتائج التي حصلنا عليها بخصوص المراجع العطالية ومن نظرية النسبية الخاصة .

لنتصور قرصاً صلباً واسعاً نرسم عليه دائرتين مركزاهما مركز القرص ، إحداهما صغيرة جداً والأخرى كبيرة جداً وتنطبق على محيط القرص (شكل ٦٥) . يوجد راصد خارج القرص يرسم على ورقة تحت القرص دائرتين أخريين ينطبق محيطاهما تماماً على محيطي الدائرتين المرسومتين على القرص . لنفترض أن هذا الراصد الخارجي مربوط ، هو والورقة ، بمرجع عطالي واحد . فتكون الهندسة الإقليدية صالحة عنده ، فيجد أن نسبة محيطي الدائرتين تساوي نسبة نصفي قطريهما ، لنفترض الآن أن القرص يدور وحده بسرعة كبيرة بالنسبة للراصد الخارجي . من الواضح أن الدوائر تظل منطبقة كما كانت ، فلا يغير هذا الأمر شيئاً بالنسبة للراصد الخارجي . لنتصور الآن راصداً آخر يعيش على القرص الدوار ؛ فكيف يكون الأمر بالنسبة له ؟ إن مرجع الراصد على القرص غير عطالي وهو لهذا السبب محظور في رأي الفيزياء التقليدية وفي رأي النسبية المقصورة أيضاً . لكننا عندما نود أن نجد لقوانين الفيزياء أشكالاً جديدة تصح في كل مرجع يجب علينا أن نأخذ بعين الاعتبار حالة الراصد على القرص ، وحالة الراصد الخارجي . لنفترض أيضاً أن الراصد



شكل (٦٥)

على القرص وهو يهتم بقياس محيطي الدائرتين ونصفي قطريهما ، يستخدم المسطرة نفسها التي يستخدمها الراصد الخارجي . وكلمة « نفسها » تعني أنه يستعيرها من الراصد الخارجي[١] .

يبدأ الراصد على القرص بقياس محيط الدائرة الصغيرة . لابد أنه سيجد قيمة تساوي القيمة التي يجدها الراصد الخارجي لمحيط دائرته الصغيرة ؛ لأن نقاط القرص القريبة جداً من مركز الدوران ذات سرعات خطية صغيرة جداً مما يتيح لنا تطبيق قوانين الميكانيك التقليدي دون حرج وإهمال مفعول النسبية الخاصة . وهذا يعني أيضاً أن طول المسطرة لا يتقلص قرب المركز ، مما يجعل قياس نصف قطر الدائرة الصغيرة يساوي القيمة المماثلة التي يجدها الراصد الخارجي . وهكذا تتطابق نتائج القياس على الدائرة الصغيرة عند كل من الراصدين . والآن يبدأ الراصد على القرص بقياس نصف قطر الدائرة الكبيرة ، فيجد أيضاً قيمة مطابقة لتلك التي وجدها الراصد الخارجي لأن المسطرة ، وهي عمودية على اتجاه حركتها لا يتقلص طولها بموجب نظرية النسبية الخاصة (راجع الشكل ٥٧) . ونتيجة هذا ، حتى الآن ، أن القياسات الثلاثة ، لنصفي القطرين ولمحيط الدائرة الصغيرة ، متطابقة لدى الراصدين . ولقياس محيط الدائرة الكبيرة نفترض أن الراصد على القرص موجود في مركز الدوران[٢] وهي نقطة ثابتة ؛ مما يجعله ، هو والراصد الخارجي ، في مرجع واحد . إن المسطرة على محيط القرص ، وهي تتحرك بسرعة خطية كبيرة بالنسبة للراصد الخارجي ، تبدو له متقلصة لأنها تتحرك وفق طولها ؛ فيبدو محيط الدائرة الكبيرة (أو محيط القرص ، لأنهما منطبقان) أكبر مما كان عليه (يزداد عدد « المساطر المتقلصة » لتغطية المحيط نفسه) لدى الراصد الخارجي . وكذلك الأمر بالنسبة للراصد في مركز القرص ، لأن الراصدين في مرجع واحد . وبنتيجة ذلك كله يتضح أن قياس محيط الدائرة الكبيرة فقط يختلف من راصد لآخر ، بينما تتطابق القياسات الأخرى لدى الراصدين . وهكذا نجد أن نسبة نصفي القطرين تساوي نسبة المحيطين لدى الراصد الخارجي فقط وعلى ورقته ؛ لكن الأمر ليس كذلك بالنسبة للراصد على القرص ولو كان ثابتاً في مركز دوران عالمه . وهذا يعني أن الراصد على القرص لايستطيع أن يؤكد صحة الهندسة الإقليدية في مرجعه .

وبعد أن يصل الراصد على القرص إلى هذه النتيجة يمكنه أن يصرح بأنه لايريد مراجع

---

(١) أو إحدى مسطرتين لهما طول واحد عندما تكونان ساكنتين معاً في مرجع واحد .

(٢) واضح ، مما تقدم ، أن هذا الشرط ليس ضرورياً في القياسات الثلاثة الأولى . (المترجم) .

لاتصح فيها الهندسة الإقليدية . إن انهيار الهندسة الإقليدية ناجم عن الدوران المطلق ، عن واقع أن مرجعه رديء ومحظور . لكنه ، وهو يحاكم بهذا الشكل ، يرفض الفكرة الأساسية لنظرية النسبية العامة . لكننا إذا رغبنا في نبذ الحركة المطلقة وفي الاحتفاظ بفكرة النسبية العامة ، فلا بد لنا من بناء فيزياء جديدة على أساس هندسة أكثر عمومية من هندسة اقليدس ؛ ولامناص من سلوك هذا الطريق إذا أردنا أن تكون كل المراجع مقبولة .

إن التغييرات التي تدخلها نظرية النسبية العامة لاتقتصر على الفضاء فحسب . ففي النسبية المقصورة كان لدينا ، في كل مرجع ، ميقاتيات ساكنة ومتزاملة وذات إيقاع واحد ؛ أي أنها تشير بالتواقت إلى زمن واحد ، فماذا يحدث لميقاتية مربوطة بمرجع لاعطالي ؟ إن التجربة المثالية ذات القرص الدوار تفيدنا هنا أيضاً . فالراصد الخارجي يملك في مرجعه العطالي ميقاتيات جيدة متزاملة وتعمل بإيقاع واحد . أما الراصد على القرص فيحتاج ، على الأقل ، إلى ميقاتيتين متماثلتين ، يضع أولاهما عند الدائرة الصغيرة ، والثانية عند محيط القرص . فالميقاتية الأولى ذات سرعة خطية صغيرة بالنسبة للراصد الخارجي ؛ مما يجعلنا نستنتج دون تردد أن إيقاعها لن يختلف عن إيقاع الميقاتيات الخارجية . لكن الميقاتية الموضوعة عند محيط القرص ، وهي ذات سرعة خطية كبيرة ، سيتغير إيقاعها بالنسبة لإيقاع الميقاتيات الخارجية ، وكذلك بالتالي ، بالنسبة للميقاتية الموضوعة قرب المركز . وهكذا يتفاوت إيقاع الميقاتيات المربوطة بالقرص الدوار من المركز إلى المحيط . فبنتيجة ذلك كله وبموجب نظرية النسبية الخاصة نرى من جديد أنه لايمكننا ، في المرجع الدوار ، أن نجد وسيلة تشبه الوسائل التي طبقناها في المرجع العطالي الواحد لنحصل على ميقاتيات متزاملة وذات إيقاع واحد .

ولإيضاح النتائج التي يمكن أن نستخلصها من تجربةالقرص الدوار ومن تجارب مثالية أخرى شرحناها سابقاً ، نتصور من جديد حواراً بين الفيزيائي التقليدي ، **ت** ، والفيزيائي الحديث ح ، المؤمن بنظرية النسبية العامة . الفيزيائي **ت** هو الراصد الخارجي المربوط بمرجع عطالي ، والفيزيائي ح هوالراصد الذي يعيش على القرص الدوار .

ت : أشعر أن الهندسة الإقليدية غير صحيحة عندك . لقد راقبت عمليات قياساتك واعترف أن نسبة المحيطين لا تساوي ، في مرجعك ، نسبة نصفي القطرين . لكن هذا يدل على أن مرجعك مرجع محظور ، أما مرجعي فهو ، على العكس ، مرجع عطالي وأنا أستطيع بكل اطمئنان

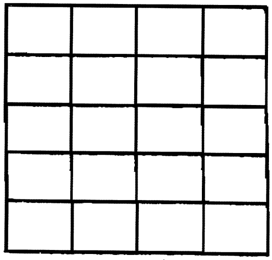
أن أعتمد على الهندسة الإقليدية . إن قرصك في حالة حركة مطلقة وهو ، من وجهة نظر الفيزياء التقليدية ، مرجع محظور لا تصح فيه قوانين الميكانيك .

ح : لا أريد كلاماً عن الحركة المطلقة . إن مرجعي لا يختلف في الجودة عن مرجعك . لأنني رأيت أن مرجعك هو الذي يدور بالنسبة لقرصي ، وليس لأحد الحق في أن يمنعني من أن أنسب كل الحركات إلى قرصي .

ت : لكن ، ألم تشعر بقوة غريبة تجذبك من مركز القرص نحو محيطه ؟ فلو لم يكن قرصك يدور بسرعة كبيرة لما حدثت الظاهرتان اللتان شعرت بهما ، أي لما كنت أحسست بالقوة التي تجذبك نحو خارج القرص ، ولما علمت أن الهندسة الإقليدية فاسدة في مرجعك . ألا تكفي هذه الوقائع لإقناعك بأن مرجعك في حالة حركة مطلقة ؟

ح : ألف كلا . لقد شعرت حقاً بالواقعين اللذين تذكرهما ، ولكنني أعزوهما إلى حقل تثاقلي طارئ يؤثر في قرصي . وبما أن هذا الحقل التثاقلي يتجه نحو خارج القرص ، فهو يشوه شكل قضباني الصلبة ويغير إيقاع ميقاتياتي . إن الحقل التثاقلي والهندسة الإقليدية وتفاوت إيقاع الميقاتيات ، هي عندي مترابطة فيما بينهما ترابطاً وثيقاً . فما علي إذن ، في سبيل أن أتبنى أي مرجع ، سوى أن أفترض وجود حقل تثاقلي ملائم وتأثير هذا الحقل على القضبان الصلبة وعلى الميقاتيات .

ت : ولكن هل تشعر بشدة الصعوبات التي تضعها النسبية العامة في طريقك . ولكي أوضح لك ما أعنيه أستعير مثالاً بسيطاً ليس من الفيزياء في شيء . تصور مدينة أمريكية مثالية ذات شوارع وأزقة متوازية عمودية على الشوارع . يوجد بين الشوارع مسافات متساوية ، وبين الأزقة مسافات متساوية أيضاً ، كما ترى في الشكل ٦٦ ، مما يجعل مستطيلات العمارات متساوية تماماً . إنني بهذه الصورة أستطيع أن أحدد موضع أية عمارة بسهولة . لكن هذا التنظيم لا يمكن إجراؤه في غير الهندسة الإقليدية . ونحن مثلاً لانستطيع أن نغطي الكرة الأرضية كلها بعمارات من هذا الشكل ، كمدينة امريكية واحدة مثالية . وما عليك سوى أن تلقي نظرة على هذه الكرة كي تقتنع بما أقول . وكذلك الأمر بخصوص قرصك ؛ فنحن لايمكن أن نغطيه بعمارات تؤلف مثل تلك « المدينة الأمريكية » . إنك تقول بأن قضبانك تتشوه بالحقل التثاقلي . وبما أن واقعك لا يسمح بأن تؤيد هندسة اقليدس ، بسبب عدم تساوي نسبتي المحيطين ونصفي القطرين ، فإن هذا يعني بأنك لو حاولت رسم شوارع طويلة وأزقة طويلة فستصادف صعوبات تجعل هذا الأمر مستحيلاً على

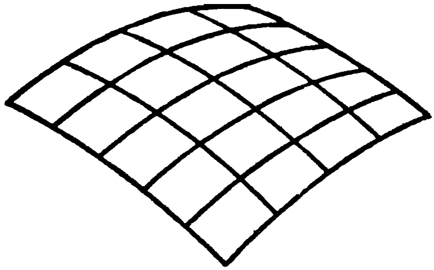


شكل (٦٦)

قرصك . إن هندستك على القرص الدوار تشبه الهندسة على سطح منحن ، إذ يستحيل أن نرسم على مساحة كبيرة من سطح منحن شوارع وأزقة على الطراز الأمريكي . لنأخذ ، كمثال فيزيائي ، سطحاً مستوياً ؛ ثم لنسخن مناطقه المختلفة إلى درجات حرارة متفاوتة بين منطقة وأخرى . إن هذا السطح سيتقوس وينحني بشدة متفاوتة من منطقة لأخرى . فهل تستطيع أن تلصق قضبانك الحديدية التي تتمدد بالحرارة ، على هذا السطح بحيث تصنع شكلاً « متوازياً متعامداً » كالشكل ٦٦ ؟ بالتأكيد لا .. إن « حقلك التثاقلي » سيتلاعب بمساطرك كما تتلاعب درجة الحرارة بالقضبان الحديدية .

ح : إن كل ذلك لا يرهبني . إن رسم الشوارع يهدف إلى تعيين أماكن النقاط (العمارات) وتفيد الميقاتية في معرفة ترتيب الحوادث الزمني . وليس من الضروري في سبيل ذلك أن تكون المدينة من طراز أمريكي ؛ فطراز المدن الأوروبية القديمة يفي بالغرض . تصور أن مدينتك المثالية مبنية من مادة لدنة ثم تشوهت (شكل ٦٧) ؛ إنني سأظل قادراً على عد العمارات وعلى تمييز الشوارع والأزقة ، رغم أنها لن تظل مستقيمة ولامتساوية الفواصل . ألا تكفي خطوط الطول وخطوط العرض على سطح كرتنا الأرضية ، وهو سطح منحن ، لتعيين الأماكن عليه رغم أن هذه الخطوط ليست من طراز « المدينة الأمريكية » ؟

ت : ما تزال توجد مشكلة أخرى . إنك ستضطر لاستخدام « بنية مدينة أوربية » . أوافقك على أنك تستطيع ترتيب النقاط والحوادث ؛ لكن هذه البنية ستولد صعاباً في قياس المسافات . إنها لن تعطيك **الخواص المترية** للفضاء ، على عكس ما يفعل بنائي . خذ هذا المثال : إنني ، في مدينة أمريكية ، أعرف أن السير مسافة عشر عمارات يتطلب مني أن أمشي ضعفي



شكل (٦٧)

المسافة التي تغطي خمس عمارات . فبمعرفة أن أطوال العمارات متساوية يمكنني أن أعين المسافات سريعاً .

ح : هذا صحيح . فأنا فعلاً لا أستطيع ، في « مدينتي الأوربية » ، أن أعرف المسافات بعدّ العمارات ذات الامتداد المشوه ، وعلي أن أعلم شيئاً إضافياً ، أن أعرف الخواص الهندسية لسطحي . فكل امرئ يعرف أن المسافة بين خطي الطول صفر و ١٠° عند خط الاستواء لاتساوي المسافة بينهما قرب القطب الشمالي . لكن كل الملاحين يعرفون ما يجب عمله لتعيين المسافة بين نقطتين على سطح الكرة الأرضية ، لأنهم يعرفون الخواص الهندسية لهذا السطح . فهم إما أن يفعلوا ذلك حسابياً بالاستناد على علم المثلثات الكروي ، وإما تجريبياً بالسير على مسافتين بسرعة واحدة . إن المسألة بسيطة في حالتك لأن الشوارع مفصولة بمسافات متساوية وكذلك الأزقة . أما في حالة الأرض فالمسألة أكثر تعقيداً ؛ فالخطان صفر و ١٠° يلتقيان عند قطبي الأرض ويتباعدان أكثر ما يمكن عند خط الاستواء . وأنا كذلك أتطلب في « مدينتي الأوربية » ، كي أعرف المسافات ، معرفة شيء آخر زيادة عنك . ويمكن أن أكتسب هذه المعرفة الاضافية بدراسة الخواص الهندسية للمتصل ، الذي أعمل فيه ، في كل حالة خاصة .

ت : لكن كل هذا يظهر عظم مزعجات الموقف الذي نحشر أنفسنا فيه عندما نهجر البنية البسيطة للهندسة الاقليدية لننشئ بناءً معقداً نضطر لاستخدامه . فهل هذا ضروري حقاً .

ح : بالتأكيد عندما نريد أن نستعمل فيزياءنا في أي مرجع دون أن نهتم بالمرجع العطالي الذي لا نجده ؛ فأنا أعترف بأن جهازي الرياضي أشد تعقيداً من جهازك ، لكن افتراضاتي الفيزيائية أبسط وأكثر انسجاماً مع الطبيعة وكثيراً ما تبرر الغاية الوسيلة .

لقد اقتصرت هذه المناقشة على المتصل ذي البعدين . لكن نقطة الخلاف في النسبية العامة أكثر تعقيداً لأن هذه النظرية تتناول متصلاً ذا أربعة أبعاد . بيد أن الأفكار هي نفسها في الحالتين . ونحن في النسبية العامة لانستطيع استخدام بنية القضبان المتوازية والمتعامدة ولا الميقاتيات المتزاملة بعكس ما نفعل في النسبية الخاصة . ففي مرجع اختياري لانستطيع تعيين النقطة واللحظة ، اللتين حدث فيهما الحادث ، بواسطة قضبان صلبة وميقاتيات ذات إيقاع واحد ومتزاملة ، كما كنا نفعل في المرجع العطالي وفي النسبية الخاصة . لكن القياسات الواقعية ، وهي تتطلب مساطر صلبة وميقاتيات ذات إيقاع واحد ومتزاملة ، لايمكن إجراؤها إلا في المراجع الموضعية ، المحدودة في المكان وفي الزمان ؛ لكن هذا الهدف يمكن بلوغه في إطار النسبية الخاصة . أما في النسبية العامة فإن المرجع « الجيد » موضعي فحسب ، أي أن صفته العطالية محدودة في المكان والزمان . وحتى في المرجع الاختياري نستطيع التنبؤ بنتائج القياسات الجارية في المرجع العطالي ؛ لكن ذلك يتطلب معرفة الخواص الهندسية للمتصل المكاني ــ الزماني .

إن تجاربنا المثالية لاتفعل أكثر من إبراز خاصة العمومية للفيزياء النسبوية الجديدة . فهي تظهر أن المسألة الجوهرية هي مسألة التثاقل وأن النسبية العامة ، فوق ذلك ، تقود إلى تعميم مفهومي المكان والزمان .

النسبية العامة وإثباتها التجريبي

إن نظرية النسبية العامة تهدف إلى صوغ قوانين فيزيائية لكل المراجع ، عطالية أم لا ، ومسألتها الأساسية هي مسألة التثاقل . إنها تبذل مجهوداً جدياً لصوغ قانون التثاقل بشكل جديد . فهل هذا شيء ضروري حقاً ؟ لقد عرفنا إنجازات نظرية نيوتن وعرفنا أيضاً فضله على تطور علم الفلك المستند على قانونه في التثاقل . إن هذا القانون أساس كل الحسابات الفلكية . لكننا تعرفنا أيضاً على الانتقادات التي وجهت إلى النظرية القديمة . إن قانون نيوتن لايصح إلا في المراجع العطالية للفيزياء التقليدية . فهذه المراجع تتعرف ، كما نعلم ، بوجوب كونها إطاراً تصح فيه قوانين الميكانيك . إن القوة المتبادلة بين كتلتين تتوقف شدتها على المسافة بينهما . وهذه الصلة ، بين القوة والمسافة ، هي كما نعلم لامتغيرة إزاء التحويل التقليدي . لكن قانون اللاتغير هذا لايتفق مع نظرية النسبية المقصورة ؛ لأن المسافة ليست لامتغيرة إزاء تحويل لورنتز . ويمكننا أن نحاول ، كما حاولنا بنجاح كبير في مسألة الحركة ، تعميم قوانين التثاقل حتى تصبح منسجمة مع نظرية النسبية الخاصة ، أو بتعبير آخر ، أن نصوغها بحيث تصبح لامتغيرة إزاء تحويل لورنتز ، لا إزاء التحويل

التقليدي . لكن قانون التثاقل يستعصي على كل جهودنا الهادفة إلى تبسيطه وتدبيره كي يدخل في إطار النسبية الخاصة . وحتى لو كنا نجحنا في ذلك فلابد من خطوة أخرى : من خطوة تذهب من مرجع النسبية الخاصة العطالي إلى مرجع النسبية العامة الاختياري . ولقد ثبت لنا بوضوح ، من جهة أخرى ومن خلال التجارب المثالية على المصعد أثناء سقوطه الحر ، أن لا أمل في التوصل إلى بناء نظرية النسبية العامة قبل أن نحل مسألة التثاقل . وقد اتضح لنا ، من خلال المناقشة ، أن حل مسألة التثاقل في الفيزياء التقليدية ليس الحل الملائم في النسبية العامة .

ولقد حاولنا أن ننير الطريق الذي يؤدي إلى النسبية العامة وأن نبسط الأسباب إلتي تجبرنا ، مرة أخرى ، على تغيير رؤانا القديمة . ونريد الآن أن نكشف النقاب ، بمقارنة هذه النظرية بالنظرية القديمة ودون أن نستطرد إلى بنيتها الشكلية ، عن السمات المميزة لنظرية التثاقل الجديدة . ولانظن أنه سيكون من الصعب ، بعد كل ما قلناه حتى الآن ، أن ندرك طبيعة هذه الفروق .

١ ــ إن معادلات التثاقل في نظرية النسبية العامة يمكن أن تطبق على أي مرجع . وإن اختيار مرجع خاص لكل حالة خاصة ليس سوى قضية سهولة وتيسير . فكل المراجع مقبولة مبدئياً . وعندما نتجاهل التثاقل نعود تلقائياً إلى المرجع العطالي للنسبية المقصورة .

٢ ــ إن قانون نيوتن في التثاقل يربط حركة الجسم هنا بالفعل الناجم ، في اللحظة نفسها ، عن جسم موجود على مسافة بعيدة . إن هذا القانون يطرح نموذجاً لكل الأفكار القديمة . لكن هذه الأفكار قد انهارت . فقد طرحت معادلات مكسويل نموذجاً جديداً لقوانين الطبيعة ؛ فهي معادلات بنية . وهي تربط ما يحدث هنا والآن بما سيحدث في الجوار المباشر وبعد فترة قصيرة جداً ؛ إنها تصف تغيرات الحقل الكهرطيسي . وقوانين التثاقل الجديدة هي أيضاً قوانين بنية ، وتصف تغيرات حقل التثاقل . وبتشبيه مبسط يمكن أن نقول : إن الانتقال من قانون نيوتن في التثاقل إلى نظرية النسبية العامة تشبه ، إلى حد ما ، الانتقال من نظرية المائعين الكهربائيين وقانون كولون إلى نظرية مكسويل .

٣ ــ إن دنيانا ليست إقليدية . إن الطبيعة الهندسية لعالمنا تصنعها الكتل والسرع . وتسعى معادلات التثاقل في النسبية العامة إلى إلقاء الضوء على خواص عالمنا الهندسية .

لنفترض أننا نجحنا في تنفيذ برنامج النسبية العامة بدقة . أليس في ذلك خطر أن نبتعد ، في تكهناتنا ، عن الواقعية أكثر من اللازم ؟ فنحن نعرف أن النظرية القديمة تفسر الأرصاد الفلكية

جيداً . فهل من إمكانية لمد جسر بين النظرية وهذه الأرصاد ؟ إن كل تكهن يجب أن يوضع على محك التجربة ، وكل نتيجة ، مهما استهوتنا ، يجب نبذها إذا لم تتفق مع الواقع . فهل تصمد نظرية النسبيـة العـامة أمام امتحـان التجربة ؟ وكجواب عن هذا السـؤال نطرح المقولة التـاليـة : إن النظرية القديمة حالة حدية خاصة من الجديدة ؛ فإذا كانت قوى التثاقل ضعيفة نسبياً فإن قانون نيوتن القديم يصبح تقريباً جيداً لقوانين التثاقل الجديدة . وعلى هذا الأساس فإن كل الأرصاد التي تؤيد النظرية القديمة تؤيد أيضاً نظرية النسبية العامة ؛ فالنسبية العامة تشرف من علٍ على النظرية القديمة .

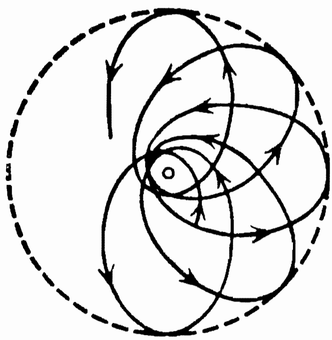
إن من واجبنا ، ونحن نملك حرية الاختيار ، أن نختار بين النظريتين حتى ولو لم نتمكن من اختراع أرصاد جديدة تشهد لصالح النظرية الجديدة ، وحتى لو كان التفسير الذي تعطيه إحداهما يساوي في الجودة التفسير الذي تعطيه الأخرى . إن معادلات النظرية الجديدة هي ، من ناحية الشكل ، أعقد بكثير ؛ لكن الافتراضات الكامنة في أعماقها هي ، من ناحية المبادئ الأساسية ، أبسط . وفيها يزول الشبحان المرعبان للفضاء المطلق وللمرجع العطالي . ويؤخذ بعين الاعتبار فيها تكافؤ الكتلة الثقالية مع الكتلة العطالية . وليس من الضروري فيها إصدار أية فرضية عن التثاقل وعن علاقته بالمسافة . ومعادلات التثاقل لها فيها شكل قوانين بنيوية ، وهو شكل أصبح مطلوباً في كل قوانين الفيزياء منذ الإنجازات العظيمة لنظرية الحقل .

ويمكن فوق ذلك أن نستخلص من قوانين التثاقل الجديدة نتائج جديدة لايحتويها قانون نيوتن في التثاقل . وقد تكلمنا فيما سبق عن إحدى هذه النتائج ، ألا وهي انعطاف الشعاع الضوئي في حقل التثاقل . ونريد الآن أن نذكر نتيجتين أخريين .

لئن كانت القوانين القديمة تنبع من القوانين الجديدة عندما تكون قوى التثاقل ضعيفة ، فإن الفروق بينها وبين قوانين نيوتن لاتبرز بشكل جلي إلا في حقول تثاقل شديدة نسبياً . لنتخذ منظومتنا الشمسية مثالاً . إن الكواكب ، بما فيها الأرض ، تدور حول الشمس في أفلاك إهليلجية . والكوكب عطارد أقربها إلى الشمس . فالشمس تجذب عطارد بأشد بكثير مما تجذب الكواكب الأخرى ، بسبب صغر المسافة بينهما . فإذا كان هناك أمل في اكتشاف انحراف عن قانون نيوتن فإن عطارد يتيح لنا أحسن فرصة . فالنظرية القديمة تتنبأ بأن المدار (الفلك) الذي يرسمه هذا الكوكب هو من نوع مدارات الكواكب الأخرى لكنه يتميز عنها بقربه من الشمس فقط . إن نظرية النسبية العامة تنبئ بأن مداره يجب أن يشذ قليلاً ؛ فهو إهليلجي نعم ؛ لكن هذا

الإهليلج يدور هو الآخر ببطء شديد بالنسبة لمرجع مربوط بالشمس ، كما في الشكل ٦٨ . إن دوران هذا الإهليلج هو الشيء الجديد الذي تتنبأ به النسبية العامة ولايتنبأ به قانون نيوتن . إن إهليلج عطارد يقوم بدورة كاملة في الفضاء خلال ثلاثة ملايين سنة . إنه كما نرى مفعول نسبوي صغير جداً لدرجة أن لا أمل لنا في كشفه عند الكواكب الأخرى الأبعد عن الشمس .

إن دوران إهليلج عطارد كان معروفاً قبل النسبية العامة لكن تفسيره لم يكن معروفاً . وقد تطورت النظرية دون أن تعير اهتماماً لهذه المشكلة . ولم يتم تفسيرها إلا في وقت متأخر عندما اتضح ، من خلال معادلات النسبية العامة ، أن إهليلجات الكواكب لابد أن تدور بالنسبة لمرجع الشمس . وكان نجاح النسبية ، في حالة عطارد ، نصراً مبيناً أحرزته النظرية الجديدة على قانون نيوتن .



شكل (٦٨)

على أن النسبية العامة تقود إلى نتيجة جديدة أخرى يمكن أن نخضعها للتجربة . فلقد رأينا أن الميقاتية الموضوعة على محيط القرص الدوار ذات إيقاع مختلف عن إيقاع الميقاتية الموضوعة قرب مركز الدوران . وهذا يعني أن الميقاتية الموجودة على الشمس يجب أن يختلف إيقاعها عن إيقاع الميقاتية الموجودة على الأرض بسبب أن حقل تثاقل الشمس أشد بكثير من حقل التثاقل عند سطح الأرض .

إن معدن الصوديوم يصدر ، وهو في حالة توهج ، ضوءاً أصفر متجانساً ذا طول موجة معين . إن ذرة الصوديوم تصدر في هذا الإشعاع إيقاعاً خاصاً : فالذرة إذن بمنزلة ميقاتية يتمثل

إيقاعها بطول موجة الضوء الصادر عنها . فبموجب نظرية النسبية العامة لابد لطول الموجة الصادرة عن ذرة الصوديوم من أن يزداد قليلاً عندما تكون الذرة على الشمس[1] .

إن مسألة وضع نتائج النسبية العامة على محك التجربة عملية صعبة ومعقدة ولم تجد كلها حلولاً . ولكن بما أننا نهتم هنا بالأفكار الأساسية فلن نغوص فيها إلى أعماق أكبر ، ونكتفي بأن نذكر أن التجارب التي أجريت حتى الآن تبدو مؤيدة للنتائج المستخلصة من نظرية النسبية العامة .

الحقل والمادة

لقد رأينا كيف انهارت وجهة النظر الميكانيكية ولماذا . فقد استحال تفسير كل الظواهر بافتراض فعل قوى بسيطة بين جسيمات خالدة . وقد تكللت محاولاتنا الأولى ، في تجاوز وجهة النظر الميكانيكية وفي إدخال مفهوم الحقل ، بالنجاح في الظواهر الكهرطيسية . فقد أمكن صوغ قوانين بنية للحقل الكهرطيسي ، تصل فيما بين الظواهر مرحلة فمرحلة في المكان وفي الزمان . وهذه القوانين تتلاءم مع نظرية النسبية المقصورة ، لأنها لامتغيرة الشكل إزاء تحويل لورنتز . ثم جاءت فيما بعد نظرية النسبية العامة لتصوغ قوانين التثاقل ، التي هي أيضاً قوانين بنية ، وتصف حقل التثاقل بين الجسيمات المادية ، كما كان سهلاً أن نعمم قوانين مكسويل بحيث يمكن تطبيقها في أي مرجع ، وكذلك قوانين التثاقل في نظرية النسبية العامة .

إن لدينا واقعين : **المادة والحقل** . لاريب أننا لانستطيع حتى الآن أن نتصور أن الفيزياء كلها يمكن أن تبنى على مفهوم المادة ، كما كان يظن فيزيائيو أوائل القرن التاسع عشر . ونحن الآن نقبل بالمفهومين . فهل نستطيع أن نعتبر المادة والحقل واقعين مختلفين ومتمايزين ؟ إذا كنا إزاء جسيم صغير أمكننا أن نتصور بسذاجة أن له سطحاً محدداً ينعدم وجود الجسيم بعده ويبدأ ظهور الحقل . ففي هذه الصورة تكون المنطقة التي تصح فيها قوانين الحقل مفصولة بشكل قاطع عن المنطقة التي توجد فيها المادة ، ولكن ما هي المعايير الفيزيائية التي تسمح بالتمييز بين المادة والحقل ؟ لقد كان بالإمكان الجواب عن هذا السؤال قبل أن نعرف نظرية النسبية وذلك كما يلي : إن للمادة كتلة لكن الحقل ليس له كتلة . الحقل يمثل طاقة والمادة تمثل كتلة . لكننا نعلم الآن أن هذا الجواب ليس دقيقاً ، بسبب معلوماتنا المكتسبة لاحقاً . فقد علمتنا نظرية النسبية أن المادة تمثل مستودعات طاقة

---

(١) لقد ثبتت هذه النبوءة بعد نشر النسخة الأصلية لهذا الكتاب بزمن غير طويل . (المترجم) .

هائلة وأن الطاقة تمثل كتلة . فنحن لايمكننا إذن أن نميز كيفياً بين المادة والحقل ، لأن التميز بين الكتلة والطاقة ليس كيفياً . فالقسم الأعظم من الطاقة مكثف على شكل مادة ، لكن الحقل المحيط بالجسيم يمثل طاقة أيضاً رغم صغر كميتها . يمكن إذن أن نقول : إن المادة توجد حيث يكون تركيز الطاقة كبيراً ، والحقل يوجد حيث يكون تركيز الطاقة صغيراً وإذا صح هذا القول فإن الفرق بين المادة والحقل هو فرق كمي لاكيفي . ولامسوغ لنا أن ننظر إلى المادة وإلى الحقل وكأنهما كيفيتان مختلفتان كلياً إحداهما عن الأخرى . فليس من الحكمة إذن أن نتصور سطحاً قاطعاً يفصل بين المادة والحقل بوضوح .

وهناك بين الحقل الكهربائي والشحنة وضع مماثل . وهكذا تظهر استحالة إيجاد معيار كيفي يسمح بالتمييز بين المادة أو بين الشحنة ، والحقل .

إن قوانين البنية ، أي معادلات مكسويل ومعادلات التثاقل ، تفقد صحتها في المناطق ذات التركيز العظيم للطاقة . لكن التقسيم إلى مادة وحقل ، بعد أن علمنا التكافؤ بين الكتلة والطاقة ، أمر مصطنع وغير واضح الحدود . ألا نستطيع إذن أن ننبذ مفهوم المادة وأن نبني فيزياء تعتمد على الحقل فقط ؟ إن المادة التي تولد عندنا انطباعات حسية ليست في حقيقتها سوى تركيز شديد للطاقة في حيز صغير نسبياً . ويمكن أن ننظر إلى المادة وكأنها مناطق من الفضاء فيها حقل عظيم الشدة . وبإمكاننا ، على هذا الشكل ، أن نؤسس أرضية فلسفية جديدة غايتها تفسير الظواهر الطبيعية كلها بواسطة قوانين بنيوية صحيحة في كل مكان وزمان . فمن وجهة النظر هذه يصبح الحجر المقذوف حقلاً متنقلاً ، تخترق مناطقه العظيمة الشدة الفضاء بسرعة الحجر . إن فيزياءنا الجديدة هذه ليس فيها مكان للحقل وللمادة معاً . بل إن الحقل هو الحقيقة الوحيدة فيها . إن هذه الرؤية الجديدة مستوحاة من الإنجازات العظيمة لفيزياء الحقل ، من واقع نجاحنا في التعبير عن قوانين الكهرباء والمغنطيسية والتثاقل بشكل قوانين بنية هي ، في أعماقها ، صورة للتكافؤ بين المادة والطاقة . وبذلك يصبح هدفنا النهائي حل المسألة التالية : صياغة قوانين الحقل التي لدينا بحيث تظل صالحة حتى في المناطق ذات الكثافة الطاقية العظيمة .

لكننا لم ننجح حتى اليوم في تنفيذ هذا البرنامج بشكل مقنع ومتماسك . وإمكانية هذا التنفيذ مرهونة بما سيكشفه المستقبل . أما الآن فلا مناص لنا من أن نفترض ، في كل إنشاءاتنا النظرية ، الواقعين : الحقل والمادة .

بقي علينا ، بعد كل ما كتبناه ، أن نهتم بمسائل أساسية من نوع جديد . إننا نعرف أن المادة

كلها تتألف من عدد قليل من الأجناس الجسيمية . فكيف بنيت أشكال المادة المتعددة من هذه الجسيمات العنصرية ؟ وكيف يتم الفعل المتبادل بين هذه الأشكال وبين الحقل ؟ ولدى البحث عن أجوبة هذه الأسئلة دخلت في الفيزياء أفكار جديدة : أفكار **نظرية الكموم** .

وبمختصر القول :

لقد ظهر في الفيزياء مفهوم جديد ، هو أكثر الاختراعات أهمية منذ نيوتن : الحقل . ولقد استلزم هذا الاختراع خيالاً علمياً جباراً في سبيل إدراك أن المهم في الأمر ليس الشحنات ولا الجسيمات بل إن الحقل السائد في الفضاء الفاصل فيما بين الشحنات والجسيمات هو الحقيقة الجوهرية التي تفسر الظواهر الفيزيائية . إن مفهوم الحقل هذا تكشَّف عن خصوبة ثرة وأفضى إلى صوغ معادلات مكسويل التي تصف بنية الحقل الكهرطيسي وتسيطر على الظواهر الكهربائية كما تسيطر على الظواهر الضوئية سواءً بسواء .

وقد نشأت نظرية النسبية من مسائل الحقل . فقد اضطررنا ، بسبب تناقضات واختلالات النظريات القديمة ، إلى إعطاء المتصل المكاني ـــ الزماني خواص جديدة بحيث أصبح مسرحاً لكل ظواهر عالمنا الفيزيائي .

ولقد حدث نمو نظرية النسبية على مرحلتين : أفضت أولاهما إلى نظرية النسبية الخاصة بالمراجع العطالية ، أي المراجع التي تستجيب لقانون العطالة على الشكل الذي صاغه نيوتن فيه . فنظرية النسبية المقصورة على المراجع العطالية تستند إلى افتراضين أساسيين : إن قوانين الفيزياء هي هي في كل المراجع المتحركة بانتظام (في خط مستقيم وبسرعة ثابتة) **بعضاً بالنسبة لبعض ؛ إن لسرعة الضوء قيمة واحدة في الخلاء وفي كل المراجع دون استثناء . ومن هذين الافتراضين ، اللذين تؤيدهما التجربة ، برزت خواص جديدة للمساطر وللميقاتيات المتحركات تتجلى في أن المساطر يتقلص طولها وفي أن الميقاتيات يتباطأ إيقاعها بالحركة . فنظرية النسبية تحوِّر قوانين الميكانيك . القوانين القديمة لاتسري على الجسيم المتحرك بسرعة قريبة من سرعة النور . القوانين النسبوية السارية على الجسم المتحرك تؤيدها التجربة تأييداً قاطعاً . وثمة نتيجة أخرى لنظرية النسبية المقصورة تتجلى في الصلة بين المادة والطاقة . المادة طاقة مكثفة ، وللطاقة كتلة . إن قانوني انحفاظ الكتلة وانحفاظ الطاقة ينصهران في قانون انحفاظ واحد : انحفاظ الكتلة ـــ الطاقة .**

أما نظرية النسبية العامة فتقدم تحليلاً أعمق للمتصل المكاني ـ الزماني . إن صحة هذه النظرية لاتقتصر على المراجع العطالية . وهي تعالج مسألة التثاقل وتصوغ قوانين جديدة تصف بنية حقل التثاقل . كما أنها تدعونا إلى تحليل الدور الذي تلعبه الهندسة في توصيف العالم الفيزيائي ، أي أنها تجعل من الهندسة علماً فيزيائياً . وقد انطلقت النسبية العامة من اتخاذ التساوي بين الكتلة الثقالية والكتلة العطالية ظاهرة جوهرية ، وليس صدفة محضة كما كانت في الفيزياء التقليدية . وقد صمدت هذه النظرية أمام كل الامتحانات التجريبية التي سيقت إليها . لكن متانة هذه النظرية تكمن في تماسكها الداخلي وفي بساطة فرضياتها الأساسية .

هذا وتلح النسبية العامة على أهمية مفهوم الحقل في الفيزياء . لكن محاولات بناء فيزياء تستند على الحقل فقط لم تصب التوفيق بعد . وإلى أن يحين ذلك نجد أنفسنا مضطرين إلى افتراض وجود حقيقتين : الحقل والمادة .

الفصـــل الــرابــع

الكمـــــوم

الاستمرار والتقطع ــ الكموم العنصرية للمـادة والكهرباء ــ كموم الضوء ــ الأطياف الضوئية ــ الأمواج المادية ــ أمواج الاحتمال ــ الفيزياء والحقيقة .

الاستمـرار والتقطـع

لنبسط أمامنا خارطة لمدينة نيويورك وضواحيها ، ولنسأل : ما هي النقاط التي يمكن الوصول إليها بالسكة الحديدية ؟ وبعد أن نبحث عن هذه النقاط في كراس المحطة نؤشر في الخارطة عليها بموجب ما اطلعنا عليه في الكراس . نغير الآن سؤالنا فنقول : ما هي النقاط التي يمكن الوصول إليها بالسيارة الحافلة ؟ فإذا رسمنا على الخارطة خطوطاً تمثل كل الطرق المنطلقة من نيويورك فإن كل نقطة من هذه الطرق يمكن الوصول إليها بالحافلة . ولدينا في كل حالة سلسلة من النقاط . ففي الحالة الأولى نرى نقاطاً منفصلة تمثل محطات السكة ؛ وفي الحالة الثانية نرى نقاطاً واقعة على خطوط تمثل الطرق . أما سؤالنا الجديد فيخص المسافة التي تفصل كلاً من هذه النقاط عن مدينة نيويورك ، أو بتعبير أدق ، عن نقطة معينة من المدينة . ففي حالة المحطات نعلق أعداداً بالنقاط المؤشر عليها ؛ وهذه الأعداد متفاوتة دون انتظام على شكل قفزات عددية ذات قيم محدودة فنقول : إن المسافة بين نيويورك والأماكن التي يمكن الوصول إليها بالقطار تتغير بشكل **متقطع** . أما المسافات بين نيويورك والأماكن التي يمكن الوصول إليها بالحافلة فيمكن أن تتغير بفواصل صغيرة بقدر ما نريد أي بشكل

مستمر . فتغيرات المسافة على طريق السيارة الحافلة يمكن أن تُجعل صغيرة بشكل اختياري ، لكن الحال ليست كذلك فيما يخص تغيرات المسافة على سكة الحديد .

إن استخراج الفحم الحجري من المنجم يمكن أن يتم بشكل مستمر ، أي أن كمية الفحم يمكن إنقاصها أو زيادتها بمقادير صغيرة قدر ما نريد ونهوى . لكن عدد العمال المستخدمين لايمكن أن يتغير إلا بشكل متقطع ؛ إذ ليس من المعقول أن نقول « إن عدد العمال قد ازداد ، منذ أمس بـ ٣,٧٨٣ عاملاً » .

لو سألنا رجلاً عن كمية المال التي في جيبه ، فقد نحصل على جواب يتمثل بعدد لايحوي أكثر من مرتبتين عشريتين . فمبلغ المال يمكن أن يتغير بقفزات : بشكل متقطع . فأصغر وحدة نقدية في سوريا هي القرش وهو ما يمكن أن نسميه « الكم العنصري » . والكم العنصري النقدي للعملة الفرنسية هو السنتيم . وها نحن أمام مثالين لكمين عنصريين من النقد . ويمكن أن نقارن قيمتيهما بنسبة معينة .

يمكن أن نقول إذن : إن بعض الكميات قد تتغير بشكل مستمر ؛ وبعضها الآخر بشكل متقطع فقط ، أي على درجات لايمكن أن تتغير الكمية بدرجة أقل منها . إن هذه الدرجات التي يمكن تصغيرها تسمى **الكموم العنصرية** للكمية الخاصة التي تتألف منها .

ونحن يمكننا أن نزن كميات كبيرة من الرمل وأن نعتبر كتل هذه الكميات مقادير مستمرة بالرغم من وضوح بنية الرمل الحبيبية ؛ ولكن ، لو كان الرمل ثميناً جداً وكان الميزان المستخدم دقيقاً وحساساً جداً فلابد عندئذٍ من أن نأخذ بعين الاعتبار واقع أن كتلة الرمل تتغير بكميات كل واحدة منها تساوي عدداًصحيحاً من الحبات وبذلك تكون كتلة الحبة هي الكم العنصري . وفي هذا المثال نرى أن صفة التقطع في بنية مقدار ، كانت تعتبر بنية مستمرة ، يمكن أن نكتشفها بفضل تزايد دقة وحساسية أجهزة القياس .

ولو أردنا أن نجسد الفكرة الرئيسية لنظرية الكموم بمقولة واحدة لقلنا : **إن من الضروري أن نفترض أن بعض المقادير الفيزيائية ، التي كانت تعتبر مستمرة ، تتألف من كموم عنصرية** .

إن مجال الوقائع التي تغطيها نظرية الكموم واسع جداً . وقد ألقت الوسائل التجريبية الحديثة المتطورة ضوءاً ساطعاً على هذه الوقائع . ولما كنا لانستطيع شرح هذه التجارب هنا ، حتى الأساسية منها ، فلابد من الاكتفاء بعرض نتائجها كما هي . لأن هدفنا هو عرض الأفكار المبدئية الموجودة في أعماق هذه النظرية .

الكمـوم العنصـريـة للـمادة وللكهرباء

في الصـورة التي ترسمهـا النظرية الحركية تتألف المادة من جزيئات . فقد رأينا كيف تقود دراسة الحركة البراونية إلى تعيين الجزيء الواحد من عنصر الهدروجين ، فكانت قيمتها :

٠,٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٣٣ غراماً .

إن هذا يعني أن الكتلة ذات بنية متقطعة . فكتلة كمية من الهدروجين لايمكن أن تتغير إلا بأضعـاف صحيحـة من الدرجات الصغيرة كل منها تسـاوي كتلة الجزيء الواحد هذه . لكن التفاعلات الكيميائية تظهر أن جزيء الهدروجين يمكن أن ينقسم إلى قسمين متساويين يدعى كل منهمـا ذرة هدروجـين . ففي التفـاعـلات الكيميـائيـة تلعب الذرة ، لا الجزيء ، دور الكـم العنصري . فبتقسيم العدد السابق على ٢ نجد كتلة ذرة الهدروجين ، وهي تقريباً

٠,٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠١٧ غراماً .

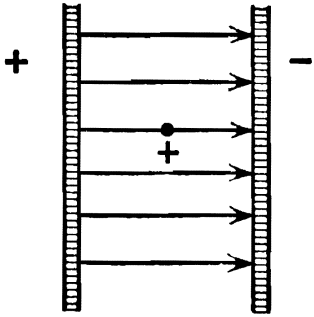
إن الكتلة مقدار متقطع . ولانحتاج طبعاً لأن نهتم بهذا التقطع عندما نزنها . وإن أعظم الموازين حساسية لعاجزة عن أن تكشف هذه الدرجة من التقطع في الكتلة .

لنعد الآن إلى واقع معروف جيداً . سلك ناقل يصل بين مربطي منبع تيار كهربائي . يسري في هذا السلك تيار من الكمون العالي إلى الكمون المنخفض . ما زلنا نتذكر أن كثيراً من الوقائع التجريبية تتفسر بالنظرية البسيطة ذات المائعين الكهربائيين اللذين يعبران السلك . ونتذكر أيضاً أن القول بأن المائع الموجب هو الذي يذهب من الكمون الأعلى إلى الكمون الأخفض ليس إلا مجرد اصطلاح يكافئ القول بأن المائع السالب يسري من الكمون الأخفض إلى الكمون الأعلى . لندع الآن جانباً كل التقدم اللاحق الذي نتج عن مفهوم الحقل . إننا سنظل أمام بعض الوقائع التي تحتاج إلى تفسير حتى ولو احتفظنا بنظرية المائعين . إن كلمة « مائع » توحي بأن الكهرباء كانت تُعتبر مقداراً مستمراً ، أي أن بالإمكان ، بموجب الرأي القديم ، أي نغير كميةالشحنة بدرجات صغيرة قدر ما نريد ؛ ولم يكن ضرورياً أن نفترض وجود كموم كهربائية عنصرية ، لكن إنجازات النظرية الحركية للمادة أبرزت سؤالاً جديداً : هل يوجد كموم عنصرية لكل مائع كهربائي ؟ وثمة مسألة أخرى لابد من معرفتها : هل يتألف التيار من سريان المائع الموجب ، أم السالب ، أم الاثنين معاً ؟

إن كل التجارب التي أجريت للإجابة عن هذه الأسئلة كانت تحاول إخراج المائع الكهربائي

من السلك ، ثم إمراره عبر الفضاء الخالي بحيث نحرمه من أي ارتباط بالمادة . ومن ثم ندرس خواصه التي ستظهر ، دون ريب ، في كل نقائها عارية من كل شيء . لقد أجريت تجارب عديدة من هذا القبيل في أواخر القرن التاسع عشر . وقبل أن نشرح التركيب التجريبي ، لإحدى هذه العمليات على الأقل ، نود أن نذكر النتائج . إن المائع الذي يمر في السلك سالب ويذهب بالتالي من الكمون الأخفض إلى الكمون الأعلى . وليتنا علمنا ذلك منذ البداية عندما كانت نظرية المائعين في أوائل أطوار نموها ، إذن لكنا وبالتأكيد قد بادلنا ما بين التسميتين ، فوصفنا شحنة قضيب المطاط بالإيجابية وشحنة قضيب الزجاج بالسلبية . ولكان عندئذٍ من الأسهل أن نعتبر المائع الذي يسري في السلك موجباً . فتخميننا الأول لم يكن موفقاً ؛ وقد سبق السيف العذل ولابد من التكيف الآن مع هذا الاصطلاح الرديء . والمسألة المهمة التي تنطرح الآن هي معرفة ما إذا كان هذا المائع السالب ذا بنية « حبيبية » ، أي إذا كان مؤلفاً من كموم كهربائية . لقد أثبتت تجارب متنوعة عديدة أن وجود كم كهربائي عنصري سالب أمر لاريب فيه ؛ أي أن المائع السالب يتألف من حبيبات ، كما يتألف رمل الشاطئ من حبيبات . وقد أطلق على كل كم من هذه الكموم السالبة اسم **الكترون** . فكل شحنة كهربائية سالبة تتألف إذن من عدد من شحنات عنصرية هي الكترونات . فالشحنة السالبة ، على شاكلة الكتلة ، لايمكن أن تتغير إلا تغيراً متقطعاً . على أن الشحنة الكهربائية العنصرية هي من الصغر لدرجة يمكن معها ، في كثير من الظواهر ودون حرج ، اعتبار الشحنة الكهربائية ذات بنية مستمرة . وهكذا نرى أن النظريات الذرية والالكترونية تتعامل مع مقادير فيزيائية متقطعة لاتتغير إلا بقفزات .

لنتصور صفيحتين معدنيتين متوازيتين موضوعتين في وعاء أفرغناه من الهواء . إحداهما مشحونة إيجابياً والأخرى سلبياً (شكل ٦٩) . فإذا أدخلنا بينهما جسيم اختبار مشحوناً إيجابياً فستنبذه الصفيحة الموجبة وتجذبه الصفيحة السالبة . فخطوط حقل القوى الكهربائية تتجه من الصفيحة الموجبة إلى الصفيحة السالبة . ولو كان جسيم الاختبار مشحوناً سلبياً لخضع إلى قوة تتجه في عكس اتجاه الحقل . ولو كانت الصفيحتان واسعتين جداً لكانت كثافة خطوط الحقل واحدة في كل مكان بينهما ؛ ولايهم عندئذٍ مكان جسيم الاختبار بينهما لأن القوة التي تتسلط عليه واحدة . فلو أدخلنا مجموعة من الالكترونات بين الصفيحتين لتصرفت كما تتصرف قطرات المطر في حقل التثاقل الأرضي ، أي لتحركت وفق خطوط مستقيمة متوازية من الصفيحة السالبة إلى الصفيحة الموجبة . والفيزيائيون لديهم طرائق عديدة لإدخال الكترونات بين الصفيحتين اللتين



شكل (٦٩)

توجهان حركتها كلها باتجاه واحد . وأسهل وسيلة لذلك هي أن نضع سلكاً ساخناً جداً بين الصفيحتين . إن هذا السلك يصدر الكترونات ذات سرعة ضعيفة يتناولها الحقل ويسرٌعها نحو الصفيحة الموجبة . فمصابيح الراديو المعروفة ، مثلاً ، تعمل بهذه الآلية ذاتها .

لقد أجريت تجارب عديدة ومتقنة على هذا الإشعاع الالكتروني ودرست انحرافات مسارات الكتروناته في حقول كهربائية وأخرى مغنطيسية خارجية . حتى أنه أمكن استفراد الكترون واحد وتم تعيين شحنته العنصرية وكتلته أي مقاومته العطالية لفعل القوة الخارجية . وبهذا الصدد نكتفي بذكر **أن كتلة الالكترون أصغر بألفي مرة تقريباً من كتلة ذرة الهدروجين** . فكتلة هذه الذرة ، على صغرها ، تبدو كبيرة جداً بالنسبة لكتلة الالكترون . وتقول إحدى نظريات الحقل الدقيقة إن كتلة الالكترون كلها ، أي كل طاقته ، هي طاقة حقله ، وأن شدة هذا الحقل هي أعظم ما تكون داخل كرة صغيرة جداً ، لكنها تضعف في المناطق البعيدة عن « المركز » .

لقد قلنا إن ذرة أي عنصر هي أصغر كمومه العنصرية . إن هذا ما كنا نعتقده خلال زمن طويل ، أما الآن فلا . فقد رسم العلم صورة جديدة تظهر حدود الصورة القديمة . فقلما نجد في الفيزياء صورة على درجة من اليقين المؤيد بالتجربة كتلك التي ترسمها الفيزياء الحديثة للبنية المعقدة للذرة . فقد أمكن التيقن أولاً من أن الالكترون ، كم المائع الكهربائي السالب ، هو أيضاً أحد مكونات الذرة ؛ هو إحدى اللبنات العنصرية التي بنيت منها الذرة ؛ والمثال الذي أوردناه عن السلك الساخن الذي يصدر الكترونات ليس سوى واحد من وقائع تجريبية عديدة مستقلة فيما بينها .

إن من السهل أن نقتلع من الذرة بضعة الكترونات مما فيها . والتسخين هو أحد الوسائل ، كما في مثال السلك المسخن ؛ ويمكن فعل ذلك أيضاً برجم الذرة بالكترونات أخرى .

لنتأمل في سلك معدني مسخن حتى الاحمرار نضعه في وعاء يحوي قليلاً من الهدروجين . إن السلك يصدر الكترونات في شتى الاتجاهات . وبفعل حقل كهربائي تكتسب هذه الالكترونات سرعة ما . وتتزايد سرعة الالكترون كما تتزايد سرعة الحجر الساقط في حقل التثاقل . فبهذه الوسيلة يمكن أن نحصل على حزمة الكترونات تتحرك بسرعة معينة في اتجاه معين . ويمكننا اليوم الحصول على سرعات تقارب سرعة النور بإخضاع الالكترونات إلى فعل حقل كهربائي شديد جداً . فماذا يحدث لو أن حزمة الالكترونات المندفعة بسرعة واحدة عالية تصدم جزيئات الهدروجين ؟ إن الصدمة التي يتلقاها الجزيء من الالكترون لايقتصر عملها على كسر الجزيء إلى ذرتيه بل وإلى اقتلاع الكترون من إحداهما .

لنقبل إذن واقع أن الالكترونات هي من مركبات المادة . فالذرة التي فقدت أحد الكتروناتها ليست حيادية كهربائياً ، لأنها ، وقد كانت حيادية ، قد فقدت شحنة عنصرية سالبة ، فأصبح القسم المتبقي منها مشحوناً إيجابياً . وبما أن كتلة الالكترون أصغر بكثير جداً من أخف الذرات ، يمكن أن نستنتج يقيناً أن الجزء الأكبر من كتلة الذرة لايكمن في الكتروناتها بل فيما يبقى منها بعد أن نسلبها كل الكتروناتها . وهذا الذي يبقى جسيمات عنصرية أثقل بكثير جداً من الالكترونات . وهذا الجزء الثقيل من الذرة يدعى **النواة** .

إن الفيزياء التجريبية الحديثة قد اخترعت تقنيات مطورة تتيح كسر نواة الذرة وتحويل ذرات عنصر كيميائي إلى ذرات عنصر كيميائي آخر واقتلاع جسيمات عنصرية ثقيلة من النواة . إن هذا الفرع من الفيزياء ، المعروف باسم « الفيزياء النووية » والذي يدين لرذرفورد **Rutherford** بإسهام كبير ، هو من أكثر فروعها إثارة من الناحية التجريبية . لكن هذا الفرع ما زال مفتقراً إلى نظرية بسيطة في أفكارها الرئيسية تتيح ربط تشكيلة وقائعه الفنية فيما بينها . وبما أننا لانهتم في هذا الكتاب إلا بالأفكار الفيزيائية العامة فسنضرب صفحاً عن هذا الفرع على ما له من أهمية في الفيزياء الحديثة .

كمـوم الضـوء

لنتأمل في جدار قائم على حافة البحر ، تضربه الأمواج باستمرار ، فتحتُّ جزءاً من سطحه

ثم تنسحب تاركة المجال لأمواج أخرى تتقدم نحوه . إن كتلة الجدار تتناقص ويمكن أن نسأل عن كمية المادة التي يخسرها في العام مثلاً . لنتخيل الآن طريقة أخرى لإنقاص كتلة الجدار بكمية مساوية لما سبق . نسدد عليه من بندقية عدداً من الرصاصات تقتلع شظايا من أمكنة ارتطامها به . تتناقص عندئذٍ كتلة الجدار ، ويمكن أن نتدبر أمرنا بحيث يكون معدل التناقص واحداً في الحالتين . لكن منظر الجدار ينبئ فيما إذا كان تناقص كتلته ناجماً عن موجة مستمرة أم عن وابل رصاص متقطع ، وسيكون من المفيد أن نفهم الظاهرتين اللتين نحن بصددهما وأن لاننسى الفرق بين فعل أمواج البحر وفعل وابل الرصاصات .

لقد ذكرنا منذ قليل أن السلك المسخن يصدر الكترونات . ونريد الآن ذكر طريقة أخرى لاقتلاع الالكترونات من المعدن . يوجد في الفيزياء ظاهرة تجريبية تتلخص في أن النور ، البنفسجي المتجانس مثلاً وهو ذو طول موجة معين ، إذا سقط على سطح معدني اقتلع منه الكترونات تندفع بسرعة معينة . فبموجب مبدأ انحفاظ الطاقة يمكن أن نقول : إن الطاقة الضوئية تتحول جزئياً إلى طاقة تكتسبها الالكترونات المقتلعة . إن التقنية التجريبية الحديثة تتيح أن نسجل هذه الرصاصات الالكترونية وأن نقيس سرعتها وبالتالي طاقتها الحركية . إن اقتلاع الضوء لالكترونات المعدن يسمى **المفعول الفوتوكهربائي** .

كانت نقطة انطلاقنا تأثير الموجة الضوئية المتجانسة ذات الشدة المعينة . وكما في كل التجارب الفيزيائية ، يجب علينا أن نحور تركيباتنا التجريبية لنرى ماذا يمكن أن نستنتج أيضاً منها .

لنبدأ بتغيير شدة الضوء البنفسجي المتجانس الساقط على الصفيحة المعدنية ولنبحث كيف تتغير عندئذٍ طاقة الالكترونات المقتلعة . لنحاول إيجاد الجواب بالمحاكمة الفكرية قبل أن نعرف جواب التجربة ، فنقول : إن قسطاً معيناً من الطاقة الشعاعية الضوئية قد تحول إلى طاقة حركية للالكترونات . فلو أنرنا الصفيحة بضوء له طول الموجة نفسها ولكنه صادر عن منبع أغزر ضوءاً فإن طاقة الالكترونات المقتلعة يجب أن تزداد لأن حزمة الضوء تحمل الآن طاقة أكبر . فيجب أن نتوقع الحصول على الكترونات ذات سرعة أكبر عندما تزداد غزارة الضوء . لكن التجربة تناقض هذا التوقع . وهكذا نرى أن الطبيعة ما تزال تخبئ لنا مفاجآت . فنحن الآن أمام إحدى التجارب التي تناقض توقعاتنا وتدمر النظرية التي نستمد منها هذه التوقعات . فنتيجة التجربة مذهلة في إطار النظرية الموجية . فالالكترونات المقتلعة تحتفظ بالسرعة ذاتها ، أي بالطاقة ذاتها ، عندما نغير غزارة الضوء دون أن نغير طول موجته .

إن هذه النتيجة التجريبية لايمكن توقعها من خلال النظرية الموجية . وبذلك نجد أنفسنا على عتبة نظرية جديدة تنشأ عن التناقض بين النظرية القديمة والتجربة .

والآن نتعمد أن نظلم النظرية الموجية للضوء وأن نتناسى إنجازاتها العظيمة وتفسيرها الناجح لانعراج الضوء حول الحواجز الصغيرة . لنركز اهتمامنا على المفعول الفوتوكهربائي ولنسأل النظرية الموجية أن تعطينا تفسيراً ملائماً . إن هذه النظرية عاجزة عن أن تفسر استقلال سرعة الالكترونات المقتلعة عن غزارة الضوء الذي يقتلعها من الصفيحة المعدنية ، ولامناص من محاولة إيجاد نظرية أخرى . وبهذه المناسبة تخطر على بالنا نظرية نيوتن الحبيبية التي نجحت في تفسير كثير من الظواهر الضوئية ولكنها فشلت في تفسير انعراج الضوء ؛ ولكننا قررنا أن نتناسى هذه الأمور . إن مفهوم الطاقة لم يكن موجوداً في عصر نيوتن ؛ فكانت حبيبات الضوء ، في رأيه ، عديمة الوزن ، وكان كل لون يحتفظ بهيولته الخاصة . وعندما اختُرع مفهوم الطاقة فيما بعد واتضح أن الضوء ينقل طاقة لم يخطر على بال أحد أن يستخدم هذا المفهوم في إطار النظرية الحبيبية للضوء ؛ فقد كانت نظرية ميتة لم يحاول أحد بعثها من جديد بشكل جدي .

فإذا اقتصرنا على الفكرة الرئيسية لنظرية نيوتن وجب علينا أن نفترض أن الضوء المتجانس يتألف من حبيبات طاقة وأن نبدل جملة « حبيبات الضوء » بجملة « كموم الضوء » وهي التي أُطلق عليها اسم **الفوتونات** ؛ إنها قسيمات صغيرة من الطاقة تندفع عبر الفضاء الخالي بسرعة النور . وهكذا يفضي نشور نظرية نيوتن على هذا الشكل إلى **نظرية الكموم الضوئية** . فالصورة الكمومية لم تعد تقتصر على المادة والشحنة وحدهما ، بل إنها الآن تشمل كموم النور أيضاً .

لقد كان بلانك **Planck** أول من أدخل فكرة كموم الطاقة ، في أوائل هذا القرن ، كي يفسر بواسطتها مفعولات أعقد من المفعول الكهربائي . لكن هذا المفعول الأخير قد أثبت بشكل قاطع وبسيط ضرورة تغيير مفاهيمنا القديمة .

لقد اتضح فوراً أن نظرية كموم الضوء تفسر المفعول الفوتوكهربائي : وابل من الفوتونات يسقط على الصفيحة المعدنية . إن التفاعل بين الإشعاع والمادة يتلخص في أن الفوتون يصطدم بالذرة ويقتلع أحد الكتروناتها بآلية خاصة . وهذه الآلية تحدث بالشكل نفسه في كل ذرة يرد عليها فوتون ، فيكون لكل الالكترونات المقتلعة طاقة معينة واحدة . وبذلك نفهم أن زيادة غزارة الضوء ليست ، في لغتنا الجديدة ، سوى زيادة عدد الفوتونات مما يتسبب في زيادة عدد الالكترونات المقتلعة من الصفيحة المعدنية لا في زيادة سرعتها . إن هذا ما تؤيده التجربة بالتمام والكمال .

ماذا يحدث لو أن ضوءاً متجانساً من لون آخر ، أحمر مثلاً لا بنفسجي ، سقط على الصفيحة المعدنية ؟ لندع التجربة تجيب عن هذا السؤال . لابد عندئذٍ من مقارنة طاقة الالكترونات التي يقتلعها الضوء الأحمر بطاقة الالكترونات التي يقتلعها الضوء البنفسجي . تدل التجربة على أن طاقة الالكترون الذي يقتلعه فوتون أحمر أصغر من طاقة الالكترون الذي يقتلعه فوتون بنفسجي . وهذا يعني أن طاقة الكم الضوئي تختلف باختلاف لون الضوء . فالفوتونات التي تنتمي إلى الضوء الأحمر تمتلك طاقة تساوي نصف ما تمتلكه الفوتونات التي تنتمي إلى الضوء البنفسجي . وبتعبير أدق : إن طاقة الكم الضوئي المنتمي إلى لون متجانس تنقص متناسبة مع تزايد طول الموجة . يوجد إذن فرق جوهري بين كموم الطاقة وكموم الشحنة الكهربائية . فكموم الضوء تختلف باختلاف طول الموجة ، بينما كموم الكهرباء هي هي دوماً . ولو أبحنا لأنفسنا استخدام أحد تشبيهاتنا السالفة لشبهنا كموم الضوء بأصغر الكموم النقدية التي تختلف من بلد لآخر .

لنستمر في إهمال النظرية الموجية للضوء ولنقبل أن بنيته حبيبية مؤلفة من كموم ، أي من فوتونات تتحرك في الفضاء بسرعة ٣٠٠ ٠٠٠ كيلومتر في الثانية . فالضوء ، في نظريتنا الجديدة ، وابل من الفوتونات ، والفوتون هو الكم العنصري للطاقة الضوئية . بيد أننا نفقد مفهوم طول الموجة عندما نستبعد النظرية الموجية . فالنصوص التي تستخدم مفاهيم النظرية الموجية يمكن أن تترجم إلى لغة نظرية الكموم الإشعاعية ، كما يلي مثلاً :

لغة النظرية الموجية	**لغة النظرية الكمومية**
إن للضوء المتجانس طول موجة محدد .	**إن الضوء المتجانس يتألف من فوتونات ذات طاقة محددة .**
إن طول موجة الضوء الأحمر من الطيف يساوي ضعفي طول موجة الضوء البنفسجي .	**إن طاقة فوتون الضوء الأحمر من الطيف تساوي نصف طاقة الفوتون البنفسجي .**

إن هذا الوضع يمكن إيجازه بالشكل التالي : يوجد ظواهر يمكن تفسيرها بنظرية الكموم ولكن لا بالنظرية الموجية ؛ من جملتها المفعول الفوتوكهربائي ، وثمة ظواهر أخرى من هذا القبيل . يوجد أيضاً ظواهر يمكن تفسيرها بالنظرية الموجية ولكن لا بالنظرية الكمومية ؛ خصوصاً انعراج الضوء حول الحواجز الصغيرة . يوجد أخيراً ظواهر يمكن تفسيرها بالنظريتين سواءً بسواء ، كانتشار الضوء في خط مستقيم .

ولكن الضوء ، ما هو في الواقع ؟ هل هو موجة أم وابل فوتونات ؟ لقد كنا قد طرحنا سؤالاً مشابهاً : هل الضوء موجة أم مطر حبيبات ضوئية ؟ لكننا ، في ذلك الوقت ، كنا نملك أسباباً

وجيهة لنبذ النظرية الحبيبية ولقبول النظرية الموجية التي كانت تفسر كل الظواهر . أما الآن فقد أصبحت المشكلة أخطر بكثير . إذ يبدو من غير الممكن أن نفسر كل الظواهر الضوئية تفسيراً متماسكاً بواحدة من هاتين اللغتين فقط . فقد نضطر إلى استخدام إحداهما تارة وإلى استخدام الأخرى تارة أخرى ويمكن أن نستخدم الاثنتين دون تمييز أحياناً . فنحن الآن أمام مشكلة من نوع لم نعهده من قبل . صورتان متناقضتان لكائن واحد ؛ كل منهما عاجزة بمفردها عن تفسير كل الظواهر الضوئية ولكنهما قادرتان على ذلك سوية .

هل يمكن أن نوفق بين الصورتين ؟ كيف نفسر هذين المظهرين المتمايزين جداً للضوء ؟ إن من الصعب جداً تذليل هذه الصعوبة ، ونحن الآن أمام مسألة أساسية .

نريد ، في الوقت الحاضر ، أن نقبل بنظرية الفوتونات وأن نحاول أن نفهم بواسطتها الوقائع التي تفسرت حتى الآن بالنظرية الموجية . وبهذه الوسيلة نبرز المصاعب التي تُظهر ، لأول وهلة ، أنه لايمكن التوفيق بين النظريتين .

لنتذكر أن الشعاع الضوئي الذي يمر من ثقب صغير جداً يولد حلقات مظلمة ومضيئة على التوالي . (راجع اللوحة الثانية) . كيف يمكن تفسير هذه الظاهرة بنظرية الكموم الضوئية وبتجاهل النظرية الموجية ؟ إن رجم الثقب بالفوتون سيولد على الشاشة الواقعة بعد الثقب إما نوراً إذا مر الفوتون من الثقب أو ظلاماً إذا لم يمر . وبدلاً من ذلك نرى حلقات مضيئة ومظلمة على التوالي . قد نحاول تفسير هذه الظاهرة بافتراض حدوث تفاعل ما بين الفوتون وحافة الثقب وبجعل هذا التفاعل مسؤولاً عن ظهور حلقات الانعراج هذه . إن تقبل هذه المقولة كتفسير لهذه الظاهرة يستلزم تساهلاً كبيراً . فهي تكاد لاتكون غير فكرة طارئة تترك لنا بعض الأمل في أن نتوصل في المستقبل إلى تفسير حلقات الانعراج بالتفاعل ما بين المادة والفوتونات .

بيد أن بصيص الأمل هذا يزول إذا تذكرنا المناقشة التي أجريناها بمناسبة تجربة أخرى . لنأخذ ثقبين محفورين برأس الدبوس . إن الضوء المتجانس الذي يمر من الثقبين يولد على الشاشة عصابات مضيئة ومظلمة على التوالي ، فكيف نفسر هذه الظاهرة في إطار نظرية كموم الضوء ؟ قد نحاكم كما يلي : يمر فوتون من أحد الثقبين . فإذا كان الفوتون يمثل جسيماً عنصرياً ضوئياً فمن الصعب جداً أن نتصور أنه ينقسم إلى قسمين يمر كل قسم من ثقب . فالنتيجة الحاصلة إذن يجب أن تماثل تماماً ما يحدث إزاء ثقب واحد : أي حلقات مضيئة ومظلمة لاعصابات مضيئة ومظلمة . فكيف يمكن للثقب الآخر ، بمجرد وجوده ، أن يغير النتيجة بهذا الشكل الجذري ؟ الظاهر أن الثقب

الذي لايمر منه الفوتون ، والذي قد يوجد على مسافة لابأس بها من الثقب الآخر ، يحوِّل الحلقات إلى عصابات . فلو كان الفوتون هو الحبيبة التي تتكلم عنها النظرية القديمة فلايمكن أن يمر إلا من واحد من الثقبين . لكن ظاهرة الانعراج تستغلق عندئذٍ على الفهم .

إن العلم يجبرنا على اختراع أفكار ونظريات جديدة الغرض منها تدمير مجموعة التناقضات التي تنتصب عقبة كأداء على طريق تقدم العلم . إن الأفكار الأساسية في العلم تنبثق من الصراع المأساوي بين الواقع ومحاولات فهمه . ونحن هنا أمام مشكل جديد يتطلب حله منطلقات جديدة . وقبل أن نبدأ عرض محاولات الفيزياء الحديثة لإزالة التناقض بين المظهر الكمومي والمظهر الموجي نريد إثبات أن هذا المشكل يبرز أيضاً عندما نتعامل مع كموم المادة بدلاً من كموم النور .

الأطياف الضوئية

لقد علمنا أن المادة تتألف من عدد قليل من الأجناس الجسيمية . وكانت الالكترونات أولى الجسيمات التي اكتشفت . لكن الالكترونات هي ، في الوقت نفسه ، كموم الكهرباء السالبة . وقد تعلمنا أيضاً أن بعض الظواهر تجبرنا على افتراض أن الضوء يتألف من كموم عنصرية تختلف فيما بينهما باختلاف طول الموجة . وقبل أن نذهب إلى أبعد من ذلك علينا أن نناقش بعض الظواهر الفيزيائية التي تلعب فيها المادة ، على حد سواء مع الإشعاع ، دوراً رئيسياً .

إن الشمس تصدر إشعاعات يمكن تحليلها بواسطة الموشور إلى مركباتها . وبهذه الوسيلة نحصل على طيف الشمس المستمر ؛ وفيه تتوالى كل أطوال الموجات المحصورة بين طرفي الطيف المرئي . لنأخذ مثالاً آخر . لقد ذكرنا أن الصوديوم المتوهج يصدر ضوءاً متجانساً من لون واحد أي من طول موجة وحيد . فإذا وضعنا الصوديوم المتوهج أمام الموشور نحصل على طيف يتألف من خط أصفر واحد فقط . وعموماً ، عندما نضع جسماً مشعاً أمام موشور فإن الضوء الصادر عن الجسم يتحلل إلى مركباته ، مما يولد طيفاً مميزاً للجسم المشع .

إن الانفراغ الكهربائي ، في أنبوب يحوي غازاً ، يؤمن لنا منبعاً ضوئياً على شاكلة مصابيح النيون الأنبوبية المستعملة في إعلانات الدعاية . لنضع أحد هذه المصابيح أمام المطياف ، وهو جهاز يعمل عمل الموشور ولكنه أدق وأكثر حساسية ؛ فيتحلل الضوء ، أي تنفصل مركباته بعضاً عن بعض . فضوء الشمس ، كما يرى من خلال المطياف ، يعطي طيفاً مستمراً : أي أن كل أطوال الموجات موجودة فيه . أما إذا كان منبع الضوء يخترقه تيار كهربائي فإن الطيف يكون ذا شكل

مختلف . فبدلاً من طيف الشمس المستمر المتعدد الألوان نرى عدداً من الخطوط المضيئة المنفصلة على أرضية مظلمة . وكل عصابة ضيقة لها لون معين ، أي بلغة النظرية الموجية ، لها طول موجة معين . فإذا رأينا مثلاً في المطياف عشرين خطاً طيفياً فإن كلاً منها يتميز بعدد خاص به ، هو طول موجته ، ومجموعة الأعداد العشرين تميز المنبع المدروس . وكذلك أبخرة العناصر الكيميائية ، كالمعادن وسواها ، يمتلك كل منها جملة خطوط طيفية وبالتالي مجموعة أعداد مختلفة . ولايمكن لأي عنصرين أن يعطيا جملتي خطوط طيفية متطابقتين ، كما لايمكن لأي شخصين أن يملكا بصمات يدوية متطابقة تماماً . وعندما نظم الفيزيائيون جدولاً بالخطوط الطيفية لكل عنصر اتضح لهم تدريجياً وجود قوانين طيفية ، وتمكنوا من تمثيل بعض سلاسل الأعداد التي تعبر عن الأطوال الموجية ، والتي كانت تُظن مستقلة فيما بينها ، بدساتير رياضية بسيطة .

إن كل ما قلناه يمكن الآن أن يترجم إلى لغة الفوتونات . إن كل خط طيفي يتعلق بطول موجة معين ، أي بفوتون ذي طاقة معينة . فالغاز المضيء لايصدر إذن فوتونات من كل الأطوال الموجية الممكنة ، بل فوتونات تتميز بها المادة المضيئة . ومن جديد نرى أن الواقع يحد من غنى الإمكانيات .

إن ذرات عنصر معين ، الهدروجين مثلاً ، لايمكن أن تصدر إلا فوتونات ذات طاقات معينة ، أي أن المباح لها هو إصدار كموم ذات طاقات معينة . أما الكموم الأخرى فممنوعة الإصدار . لنتصور ، بغية التبسيط ، عنصراً لايصدر سوى خط طيفي واحد ، أي فوتونات ذات طاقة محددة تماماً . إن الذرة الواحدة المفردة من هذا العنصر تصبح بعد الإصدار أفقر بالطاقة مما كانت عليه قبله . فينتج من انخفاض الطاقة أن **مستوى طاقة** الذرة كان قبل الإصدار أعلى منه بعده . وأن طاقة الفوتون الصادر تساوي الفرق الطاقي بين هذين المستويين . وعلى هذا يمكن أن نقول : إن ذرة العنصر الذي لايصدر سوى أمواج ذات طول وحيد محدد ، أي فوتونات ذات طاقة وحيدة ، ليس فيها سوى مستويي طاقة اثنين فقط وإن إصدار الفوتون يجعل الطاقة الكلية للذرة المصدرة تهبط من المستوى الطاقي الأعلى إلى المستوى الطاقي الأخفض .

لكن العنصر الواحد قادر عموماً على إصدار عدة خطوط طيفية ، أي أن الفوتونات الصادرة ذات طاقات متفاوتة ، وليست ذات طاقة واحدة . وهذا ما يجعلنا نفترض أن في كل ذرة عنصر يوجد عدة مستويات طاقة مباحة ، وأن إصدار فوتون واحد منها يؤدي إلى انتقالها من مستوى طاقي إلى مستوى أخفض . وبيت القصيد في هذه الأمور أن الذرة غير مباح لها أن تمتلك الطاقة التي

نريد ، إذ لولا ذلك لكانت قادرة على إصدار الأطوال الموجية التي نريد : أي فوتونات ذات طاقة اختيارية . فبدلاً من أن نقول إن الذرة الواحدة المنفردة تصدر عدة خطوط طيفية ، نقول : إن كل ذرة تتمتع بمستويات طاقة محددة وإن إصدار الفوتون الواحد يصاحبه انتقال الذرة من مستوى طاقي عال إلى مستوى طاقي أخفض ؛ فمستويات الطاقة ليست عموماً مستمرة في تواليها بل متقطعة . ومرة أخرى نرى الواقع يحد من كثرة الإمكانيات .

لقد كان بور Bohr أول من فسر لماذا تصدر الذرة خطوطاً طيفية محددة ولاتصدر سواها . فقد رسمت نظريته ، التي اقترحها منذ قرابة سبعين عاماً ، صورة للذرة تتيح ، في الحالات البسيطة على الأقل ، حساب الخطوط الطيفية والحصول على أعداد تؤلف مجموعة متماسكة رغم أنها ، في ظاهرها ، غير ذات مغزى ولا رابطة فيما بينها .

إن نظرية بور ليست سوى محطة مرحلية نحو نظرية أكثر عمقاً وأوسع شمولاً تُدعى الميكانيك الموجي أو الكمومي . وسنعمد ، فيما تبقى من هذا الكتاب ، إلى تحديد الأفكار الرئيسية في هذه النظرية . ولكن يجب قبل ذلك أن نذكر نتيجة نظرية وتجريبية ذات سمة خاصة .

إن الطيف المرئي يبدأ بطول موجة اللون البنفسجي وينتهي بطول موجة اللون الأحمر ، أو بتعبير آخر ، إن طاقات الفوتونات في الطيف المرئي محصورة بين الحدين المؤلفين من طاقتي الفوتونات البنفسجية والفوتونات الحمراء . إن هذا التحديد ناجم في حقيقته عن خواص العين البشرية . فإذا كان الفرق بين مستويي طاقة كبيراً نسبياً فإن الفوتون المتعلق به يدعى **فوق بنفسجي** وهو يعطي خطاً يقع خارج منطقة الطيف المرئي من جهة البنفسجي ؛ وبما أن العين لاتراه فيجب استعمال وسائل أخرى ، كأفلام التصوير ، كي نعلم بوجوده .

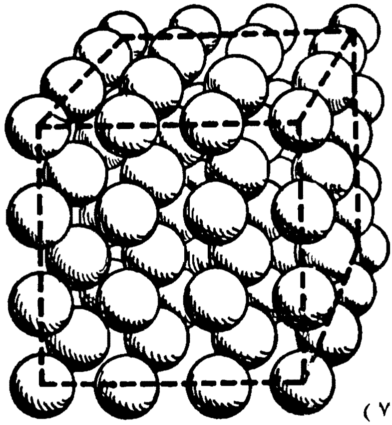
إن الأشعة السينية تتألف أيضاً من فوتونات ذات طاقة أعلى من طاقة فوتونات الطيف المرئي ، أي ذات أطوال موجية أقصر بكثير ، أقصر بآلاف المرات من الأطوال الموجية المرئية .

ولكن هل نستطيع قياس أطوال موجات على هذه الدرجة من الصغر ؟ إن في هذه العملية شيئاً من الصعوبة حتى في الضوء المرئي . وهي هنا تتطلب استخدام حواجز صغيرة أو فتحات صغيرة . فالثقبان المتجاوران المحفوران بالدبوس ، واللذان بفضلهما تتضح ظاهرة انعراج الضوء المرئي ، يجب أن يكونا أصغر مساحة وأقرب تجاوراً بآلاف المرات إذا أردنا استخدامهما لكشف انعراج الأشعة السينية .

كيف نستطيع إذن أن نقيس أطوال موجات هذه الأشعة ؟ إن الطبيعة تنجدنا في هذا المضمار .

إن البلورة هي تجمع ذرات ذات مسافات ، فيما بينها ، صغيرة جداً ؛ وهي مرتبة في تنظيم رائع . والشكل ٧٠ يمثل نموذجاً بسيطاً لتركيب إحدى البلورات . فبدلاً من فتحات صغيرة ، نحن هنا أمام حواجز صغيرة جداً تتألف من ذرات تكاد تكون متلاصقة في ترتيب منتظم مدهش . وإن المسافة بين ذرتين متجاورتين هي من الصغر بحيث نتوقع أن تصلح لكشف انعراج الأشعة السينية . وقد برهنت التجربة على إمكانية ذلك في الأبعاد المكانية الثلاثة .

لنفترض الآن أن شعاعاً سينياً يسقط على بلورة ، ولنستقبله ، بعد اختراقه لها ، على لوح تصوير ترتسم عليه صورة الانعراج . لقد استخدمت في هذا المجال طرق متنوعة لدراسة أطياف الأشعة السينية ولاستنتاج أطوال موجاتها من صورة الانعراج . وإن ما نعرضه هنا بإيجاز كبير يملأ مجلدات من الكتب الاختصاصية تعالج نواحيه النظرية والتجريبية . وقد أوردنا في اللوحة الثالثة صورة انعراج الأشعة السينية في أحد التراكيب الذي يستخدم البلورات . وفيها نرى أيضاً حلقات مضيئة ومظلمة على التوالي ، تلك الحلقات التي تتميز بها الطبيعة الموجية ، ونرى في مركزها أثر الشعاع الذي لم ينعرج . فلو لم تكن البلورة واقعة بين منبع الأشعة السينية ولوح التصوير لشاهدنا عليه بقعة واسعة مضيئة فقط . إن أمثال هذه الصور الانعراجية تتيح حساب أطوال موجات الأشعة السينية ، كما أننا إذا علمنا هذه الأطوال نستطيع دراسة ترتيب الذرات في البلورة وحساب المسافات فيما بينهما .


شكل (٧٠)

الأمـــواج المـاديـة

كيف نفسـر واقع أن بعض الأطوال الموجيـة فقط ، لا كلهـا ، تظهر في الطيف المميـز للعناصر الكيميائية .

لقد حدث كثيراً في الفيزياء أننا استطعنا إحراز تقدم كبير بواسطة تشابهات نكتشفها فيما بين ظواهر تبدو ، لأول وهلة ، مستقلة فيما بينها . ولقد أوردنا ، في هذا الكتاب وفي مناسبات عديدة ، أفكاراً ولدت وترعرعت في أحد فروع الفيزياء ثم أمكن تطبيقها على فروع أخرى بنجاح . فتطور النظرية الميكانيكية وتطور مفهوم الحقل نموذجان من هذه الطريقة . فمقارنة المسألة المطروحة بمسألة مشابهة محلولة يلقي نوراً يساعد على تذليل الصعوبات ويوحي بأفكار جديدة . على أن من السهـل الوقوع على تشـابه سطحي لايفيد في شيء . لكن اكتشـاف بعض السمات الأسـاسية المشتركة ، والمخبوءة تحت خلافات ظاهرية ، وابتداع نظرية جديدة من كل ذلك هو عمل خلاق حقيـقي . إن تطـوير الميكـانيك الموجي ، الذي ابتـدعـه دوبروي De Broglie وشـرودنغر Schrodinger منذ قرابة ستين عاماً ، لهو نموذج نوعي في استنباط نظرية خصبة من تشابه عميق وصائب .

ننطلق الآن من مثال تقليدي لاعلاقة له بالفيزياء الحديثة . نمسك باليد طرف حبل مطاطي طويل جداً ، أو طرف نابض طويل جداً ، ونحركه صعوداً وهبوطاً بإيقاع ثابت وبحيث يقوم الطرف الممسوك بحركة مهتزة . إن هذا الاهتزاز يولد ، كما رأينا في مناسبات عديدة ، موجة تنتشر على طول الحبل بسرعة معينة . فإذا كان طول الحبل لامتناهياً فإن الموجة تستمر في سيرها عليه دون توقف .

لنعتبر حالة أخرى : الحبل نفسه مثبت من طرفيه ؛ ويمكن أيضاً أن نستعمل وتر كمان . ماذا يحدث لو ولّدنا موجة عند أحد طرفي الحبل أو الوتر ؟ إن الموجة تسير كما في السابق لكنها عندما تصـل إلى الطرف الآخر تنعكس عائدة أدراجهـا . فنحن إذن أمام موجتـين ، أولاهما تولدت بالاهتزاز والأخرى بالانعكاس وتتحركان على الحبل نفسه باتجاهين متعاكسين فتتداخلان . وليس

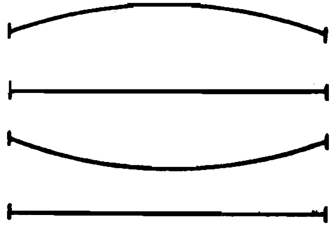


شكل (٧١)

من الصعب أن نراقب تداخل الموجتين وأن نكتشف موجة من نوع جديد ناتج عن انضامهما تدعى **موجة مستقرة** . ربما تبدو كلمتا « موجة » و « مستقرة » متناقضتين ، لكن اجتماعهما تبرره نتيجة تداخل الموجتين .

إن أبسط نموذج لموجة مستقرة هو حركة وتر مثبت من طرفيه يذهب ويجيء بالتناوب بين الأعلى والأسفل ، كما في الشكل ٧٢ . إن هذه الحركة نتيجة لانضمام موجتين تسيران في اتجاهين متعاكسين . والسمة المميزة لهذه الحركة هو أن النقطتين الطرفيتين ثابتتان ؛ فنقول إننا إزاء **عقدتين** . لأن كل نقطة ثابتة في مكانها من الموجة المستقرة تسمى عقدة . فالموجة في الشكل ٧٢ محصورة بين عقدتين ، أما النقاط الأخرى من الحبل فتصل في وقت واحد إلى انحرافها الأعظمي ، ثم في وقت واحد إلى انحرافها الأصغري .

لكن هذا الشكل هو أبسط أشكال الموجة المستقرة . فبعضها يحوي ثلاث عقد : واحدة في كل طرف وثالثة في الوسط ، كما في الشكل ٧٣ . وهذه الحالة تتضمن ثلاث نقاط ساكنة . ولو ألقينا نظرة فاحصة على هذا الشكل لرأينا أن طول الموجة فيه يساوي نصف طول الموجة في الشكل ٧٢ . هذا ويوجد أمواج مستقرة ذات أربع عقد أو خمس أو أكثر بكثير . فطول الموجة يتعلق ، في كل حالة ، بعدد العقد الذي لايمكن أن يكون إلا عدداً صحيحاً ، أي أن يتغير على قفزات . فالقول بأن « عدد العقد في موجة مستقرة يساوي ٣,٥٧٦ » هو لغو هراء . فطول الموجة لايمكن أن يتغير إلا بشكل متقطع . وفي هذا المثال البسيط التقليدي نصادف السمات المألوفة لنظرية الكموم . إن الموجة المستقرة التي يولدها عازف الكمان هي في الواقع أعقد بكثير ؛ فهي مزيج من عدد كبير من أمواج ذات عقدتين وثلاث وأربع وخمس وأكثر ، وهي بالتالي ذات أطوال موجة متفاوتة . والفيزياء قادرة على تحليل ذلك المزيج وإثبات أنه مؤلف من انضمام عدة أمواج مستقرة .

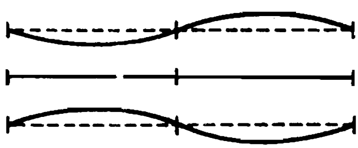


شكل (٧٢)

وباستخدام لغتنا الضوئية يمكن أن نقول : إن الوتر المهتز له طيف ، كما للعنصر المشع طيف . وكما في الطيف الضوئي ، لايمكن للوتر أن يحوي سوى أطوال موجات معينة ، أما سواها فممنوع .

وبذلك نكون قد اكتشفنا تشابهاً بين الوتر المهتز والذرة المصدرة للإشعاع . ومهما بدا هذا التشابه غريباً فإننا نرغب في استخلاص بعض النتائج منه وفي محاولة السير معه إلى نهاية المطاف ما دمنا قد اخترناه دليلاً . إن ذرات كل عنصر تتركب من جسيمات عنصرية أثقلها النواة وأخفها الالكترونات ، وإن جملة هذه الجسيمات تتصرف كآلة صوتية نولد فيها أمواجاً مستقرة .

لكن الموجة المستقرة ليست سوى نتيجة لتداخل موجتين سائرتين أو أكثر . فإذا كان هذا التشابه يحوي قسطاً من الحقيقة فيجب أن يتعلق بالبنية الأبسط من الذرة موجة سائرة (منتشرة) . لكن عالمنا المادي لايحوي شيئاً أبسط من الكترون حر من تأثير أية قوة ، فهو إما ساكن وإما متحرك بانتظام . وبذلك يمكن أن نتكهن بحلقة أخرى في سلسلة التشابه : الالكترون المتحرك بانتظام يشبه موجة ذات طول محدد . تلك هي الفكرة الجديدة الجريئة التي اقترحها دوبروي .



شكل (٧٣)

لقد أثبتنا فيما سلف وجود ظواهر يكشف الضوء فيها عن طبيعته الموجية ، وظواهر أخرى يكشف فيها عن طبيعته الحبيبية . فبعد أن تعودنا على فكرة أن الضوء موجة فوجئنا بظواهر جديدة ، كالمفعول الفوتوكهربائي مثلاً ، تفيد بأنه يتصرف كوابل من الفوتونات . والآن وبفضل دوبروي انقلب الأمر رأساً على عقب فيما يخص الالكترونات . فقد كنا تعودنا على فكرة أن الالكترونات جسيمات ، هي الكموم العنصرية للكهرباء وللمادة . وقد درسنا شحنتها وكتلتها . فإذا كان في فكرة دوبروي قسط من الحقيقة فلابد أن توجد ظواهر تتجلى فيها السمة الموجية للمادة . فللوهلة الأولى تبدو هذه النتيجة ، التي توصلنا إليها عن طريق التشابه الصوتي ، غريبة ، مستغلقة على الفهم . إذ كيف يمكن أن توجد صلة بين جسيم متحرك وموجة ؟ لكن ذلك ليس المرة الأولى التي نصادف فيها غرائب من هذا النوع في الفيزياء . فلقد شاهدنا مثيلاً لها في مجال الظواهر الضوئية .



(شكل ٧٤)

إن الأفكار الأساسية تلعب دوراً جوهرياً في تشكل نظرية فيزيائية . إن كتب الفيزياء مليئة بالدساتير الرياضية المعقدة . لكن الفكر البشري ورؤاه هي المنبع الحق لكل نظرية فيزيائية . بيد أنه لابد لهذه الأفكار من أن توضع في قالب رياضي لنظرية كمية كي يصبح بالإمكان وضعها على محك التجربة . وهذا ما يمكن تفصيله لو اتخذنا ، كمثال ، المسألة التي نحن بصددها ، أي التخمين الأساسي بأن الالكترون المتحرك بانتظام سيتصرف كموجة في بعض الظواهر . لنفترض أن الكتروناً وحيداً ، أو سيل الكترونات متساوية السرعة كلها ، تتحرك حركة منتظمة . إن كتلة الالكترون المفرد وشحنته وسرعته ، كلها ، معلومة . إن رغبتنا في أن نعلق بالالكترون ، أو بسيل الالكترونات المنتظم ، موجة بأسلوب ما ، توجب أن نطرح على أنفسنا السؤال التالي : كم يبلغ طول هذه الموجة ؟ إن هذا سؤال كمي ، والفكرة يجب أن تصاغ بشكل كمي كي تسهل الإجابة عن مثل هذه الأسئلة البسيطة . إن البساطة الرياضية لجواب هذا السؤال ، كما أعطاه دوبروي ، أمر مثير للإعجاب حقاً . ففي الوقت الذي نشر فيه عصارة أفكاره كانت التقنية الرياضية في نظريات فيزيائية أخرى حرجة ومعقدة نسبياً . لكن الرياضيات التي تعالج مسائل الأمواج المادية بسيطة جداً وبدائية رغم أن الأفكار الأساسية كانت عميقة جداً وذات شمول واسع .

لقد رأينا ، بمناسبة الأمواج الضوئية والفوتونات ، أن كل نص مصوغ باللغة الموجية ، يمكن ترجمته إلى لغة الفوتونات ، جسيمات الضوء . إن هذا القول ينسحب على الأمواج الالكترونية . فاللغة الجسيمية ، للالكترونات المتحركة بانتظام ، معروفة تماماً . لكن كل نص مصوغ بلغة الجسيمات يمكن أن يصاغ بلغة موجية ، كما هي الحال في الفوتونات تماماً . إن التشابه بين الأمواج الضوئية وبين الأمواج الالكترونية ، كالتشابه بين الفوتونات والالكترونات ، هو الآن أحد خيوطنا الموجهة . وسنجتهد في أن نستعمل أسلوباً واحداً في الترجمة ، سواءً في مجال المادة أو في مجال الضوء . ونظرية النسبية المقصورة تقدم خيطاً موجهاً آخر . فكل قوانين الطبيعة يجب أن تحتفظ بشكلها بعد أن نسلط عليها تحويل لورنتز ، لا التحويل التقليدي . إن هذين الخيطين الموجهين معاً يقودان إلى معرفة طول الموجة المواكبة للالكترون في حركته . وقد نتج منهما أن الالكترون المتحرك بسرعة خمسة عشر كيلومتراً في الثانية تواكبه موجة (نسميها **الموجة المادية**) يمكن حساب طولها

بسهولة ، وقد وُجد أن هذا الطول هو من رتبة أطوال موجات الأشعة السينية . ومن هذا نستنتج أن إمكـانيـة تعليق موجة بالالكـترون مرهونة بنجـاح تجربة انعراج نبدل فيها الأشعة السينية بوابل الكتروني .

لنتصور إذن حزمة أشعة الكترونية تتحرك بانتظام بسرعة واحدة معينة ، أو بلغة موجية ، موجة الكترونية متجانسـة ؛ ولنفترض أنها تسقط على بلورة رقيقة (تلعب دور شبكة انعراج) تتصرف على الشكـل الذي شرحناه آنفاً إذا كانت المسـافات بين ذراتها ملائمة لانعراج الأشعة السينية . وعندها نرى أنفسنا مسوقين ، في حالة الأمواج الالكترونية ، إلى توقع نتيجة مماثلة لما يحدث للأمواج السينية . فاللوح التصويري يجب أن يسجل صورة انعراج للأمواج الالكترونية التي تخترق البـلورة الرقيقـة . والواقع أن التجربة تعطي فعـلاً صـورة انعراج للأمواج المـادية المواكبـة للالكترونات ؛ وهذا ، بلاشك ، أحد الإنجازات العظيمة لهذه النظرية . ويمكن أن نرى ، في اللوحة الثالثة ، التشابه الكبير بين صورة انعراج الأشعة السينية وصورة انعراج الموجة المادية الالكترونية . ونحن نعلم أن صورة الانعراج تتيح حسـاب طول موجة الأشعة السينية ؛ وهي هنا تتيح أيضـاً حساب طول الموجة المادية المواكبة لسيل الالكترونات . وقد كانت نتيجة هذا الحساب متفقة تماماً مع ما تنبأت به النظرية ، مما يؤيد وبشكل قاطع صحة تسلسل محاكاتنا .

كل هذا جميل جداً . لكن مشـاكلنا العويصة السالفة قد أصبحت به أشد هولاً وأوسع مجالاً . ويمكن أن نوضح هذا الأمر بمثـال يشبـه المثـال الذي أوردناه بخصوص الموجة الضوئية . فالالكترون المقذوف نحو ثقب دبوسي لابد أن ينعرج كما تنعرج الموجة الضوئية . فنحصل ، من سيـل الالكـترونات ، على حلقـات مظـلمة ومضيئة على التوالي ترتسـم على لوح التصوير . وقد يدغدغنا الأمل في إمكانية تفسير ذلك بتفاعل بين الالكترون وحافة الثقب ، رغم أن هذا التفسير لايبدو ممكناً . وماذا يجب أن نتوقع في حالة ثقبين ؟ سنحصل حتماً على عصابات مضيئة ومظلمة ، بدلاً من الحلقـات . فكيف يمكن للثقب الثـاني ، بمجرد وجوده ، أن يغير النتيجة بهذا الشكل المحير . فالالكترون كائن يستعصي على الانقسام ، ولابد له إذن من أن يمر **بكامله** من هذا الثقب أو من ذاك ، فأنى له إذن أن يعلم بوجود ثقب آخر في جوار الثقب الذي مر منه ؟

لقد كنا طرحنا الأسئلة التالية : ما هو الضوء ؟ هل هو موجة أم وابل جسيمات ؟ والآن نطرح أسئلة أخرى : ماهي المادة ؟ ماهو الالكترون ؟ هل هو جسيم أم موجة ؟ إن الالكترون يتصرف كجسيم عندما يتحرك في حقل كهربائي أو في حقل مغنطيسي خارجيين . وهو يتصرف

كموجة عندما ينعرج من خلال ذرات البلورة . فنحن إزاء الكموم العنصرية المادية نصطدم بالصعوبة نفسها التي نصادفها في حالة كموم الضوء . فالقضية الرئيسية التي يطرحها العلم الحديث هي معرفة كيفية التوفيق بين الصورتين المتناقضتين للمادة وللموجة . تلك هي الصعوبات الأساسية التي لو خرجنا منها لحققنا تقدماً علمياً كبيراً ؛ وقد حاولت الفيزياء الحديثة حل هذه المشاكل والمستقبل وحده كفيل بالحكم على هذا الحل الذي نشرحه فيما يلي .

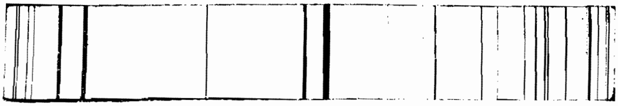
أمواج الاحتمال

يقول الميكانيك التقليدي بأننا لو عرفنا ، في لحظة واحدة ، مكان الجسيم المادي وسرعته وكذلك القوى المتسلطة عليه ، لاستطعنا التنبؤ بكل مساره المستقبلي . فالمقولة : « إن للنقطة المادية ، في اللحظة الفلانية ، المكان الفلاني والسرعة الفلانية » ذات معنى محدد في عرف الميكانيك التقليدي . ولو فقدت هذه المقولة معناها فإن المحاكمة التي أجريناها ، في الفصل الأول من هذا الكتاب بخصوص التنبؤ بالمسار المستقبلي ، تصبح عديمة القيمة .

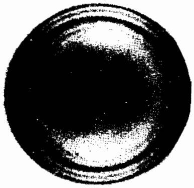
ففي أوائل القرن التاسع عشر أراد العلماء إيجاز الفيزياء في صورة قوى بسيطة تؤثر في جسيمات مادية تحتل أمكنة معينة وتتمتع بسرعات معينة في لحظات معينة . لنتذكر كيف وصفنا الحركة في أوائل مراحل سفرنا في عالم المسائل الفيزيائية . لقد وضعنا نقاطاً متوالية على طول مسار معين ؛ وهذه النقاط تشير إلى المواضع الدقيقة التي يحتلها الجسيم لحظة بعد لحظة ؛ ورسمنا الأشعة المماسية التي تدل على جهة السرعة وقيمتها . لقد كانت هذه العملية بسيطة ومقنعة . لكن إجراءها على الكموم العنصرية للمادة ، أي الالكترونات ، وعلى الكموم العنصرية للضوء ، أي الفوتونات ، غير ممكن . فنحن لانستطيع تمثيل مسار الفوتون ، أو مسار الالكترون ، بالأسلوب الذي مثلنا به الحركة في الميكانيك التقليدي . إن هذا واضح في تجربة الثقبين ، لأن الالكترون والفوتون يظهران وكأنهما يمران من كلا الثقبين في وقت واحد ، فمن المستحيل إذن أن نشرح هذا الواقع بتمثيل مسار الالكترون أو الفوتون بالطريقة التقليدية .

يجب بالطبع أن نفترض وجود عمليات إفرادية كمرور الالكترونات والفوتونات من الثقوب الصغيرة . كما أننا لانستطيع الشك بوجود الكموم العنصرية للمادة وللطاقة . لكن القوانين الأساسية لايمكن بالتأكيد صوغها بالطريقة المستخدمة في الميكانيك التقليدي لتعين أماكن هذه الكموم وسرعتها في لحظة معينة .

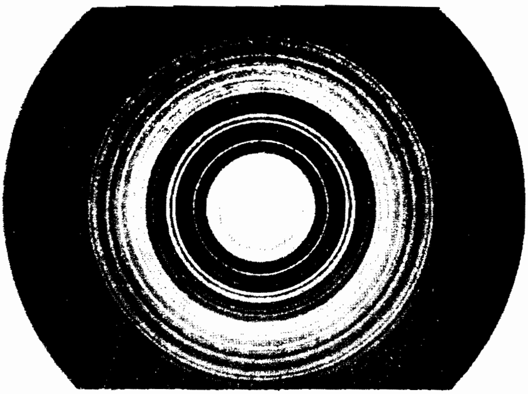
لوحـة (٣)



خطوط طيفية .



انعراج الأشعة السينية
من خلال بلورة .



انعراج وابل الكترونات
من خلال بلورة .

نريد إذن أن نحاول طريقة أخرى . لنكرر باستمرار العملية الإفرادية . إن الالكترونات تنطلق ، واحداً بعد واحد ، نحو الثقبين . إن كلمة « الكترون » مستخدمة هنا لتركيز الأفكار ، إذ إن محاكمتنا الراهنة تنطبق أيضاً على الفوتون .

إن تجربتنا تتكرر دوماً بالأسلوب ذاته ، أي أن كل الالكترونات تتحرك بسرعة واحدة نحو الثقبين . وقد لايكون من الضروري أن نذكر أننا نقوم هنا بتجربة مثالية لايمكن إجراؤها عملياً ولكن يمكن تصورها ؛ فنحن لانستطيع أن نقذف الفوتونات والالكترونات إفرادياً في لحظات مختارة كما نطلق رصاصات من بندقية .

إن النتيجة النهائية لمجموع العمليات المكررة إفرادياً لابد أن تكون حلقات مظلمة ومضيئة في حالة ثقب وحيد ، وعصابات مظلمة ومضيئة في حالة ثقبين . لكن يوجد فرق جوهري . ففي حالة الالكترون المفرد لايمكن أن نفهم ما ستعطيه التجربة ؛ لكننا نفهمها بسهولة أكبر عندما نكرر العملية مرات كثيرة . إذ نستطيع في هذه الحالة التكرارية أن نقول : إن العصابات المضيئة تظهر في الأماكن التي تستقبل عدداً كبيراً من الالكترونات ؛ لكنها تصبح أكثر ظلاماً في المناطق التي تستقبل عدداً صغيراً من الالكترونات ؛ أما المناطق المظلمة فهي تلك التي لاتستقبل أي الكترون . وليس من المباح لنا بالطبع أن نفترض أن كل الالكترونات تمر من واحد فقط من الثقبين ؛ إذ لو كان الأمر كذلك لما حدث أي فرق عندما نغلق الثقب الآخر ، ذلك أننا نعلم جيداً أن وجود الثقب الآخر يحول صورة الانعراج من حلقات إلى عصابات . وبما أن الجسيم جزء لايتجزأ فلا مبرر لأن نتوهم أنه يمر من الثقبين في وقت واحد . لكن تصور أن التجربة بكاملها قد نجمت عن تكرار التجربة الإفرادية عدداً كبيراً من المرات يفتح لنا باباً آخر للتفسير . إن بعض الالكترونات تمر من الثقب الأول وبعضها الآخر يمر من الثقب الثاني . ونحن لانعلم لماذا تقوم الالكترونات إفرادياً بعملية اختيار بين الثقبين ، لكن الذي نعرفه هو أن خلاصة التجارب الإفرادية المكررة هي أن الثقبين يخدمان كممرين لانتقال الالكترونات من منبعها إلى لوح التصوير . فإذا استطعنا فقط أن نعرف ما يحدث لجمهور الالكترونات التي تعمل في التجارب المكررة ، دون الاهتمام بسلوك كل منها على حدة ، فإن سبب الفرق بين الحلقات والعصابات يصبح مفهوماً . ذلك أن مناقشة نتيجة سلسلة من التجارب المكررة توحي بفكرة جديدة ، فكرة جمهور من الأفراد يتصرف كل منهم تصرفاً غير متوقع . فلئن كنا عاجزين عن توقع سلوك كل الكترون على حدة فإن النتيجة النهائية لجمهور

الالكترونات كلها هي عصابات مضيئة ومظلمة تظهر على لوح التصوير ، أو على الشاشة في حالة فوتونات .

لنترك مؤقتاً الفيزياء الكمومية .

لقد رأينا في الفيزياء التقليدية أن معرفة مكان النقطة المادية وسرعتها في لحظة ما ومعرفة القوى الفاعلة فيها تتيحان التنبؤ بمسارها المستقبلي . وقد رأينا أيضاً كيفية تطبيق الصورة الميكانيكية على النظرية الحركية للمادة . لكن المحاكات التي كنا أجريناها بمناسبة هذه النظرية قد ولدت فكرة جديدة . ولابد من استيعاب هذه الفكرة جيداً لأنها ستساعدنا على فهم الحجج التي سنفصّلها فيما بعد .

نحن أمام وعاء يحوي غازاً . فأثناء محاولة وصف حركة كل جسيم لابد أولاً من معرفة الحالة البدئية ، أي الأمكنة والسرعات البدئية لكل الجسيمات . لكننا حتى لو قبلنا إمكانية ذلك فإن عمر المرء لايكفي للقيام بهذه المهمة ؛ ثم لو حاولنا بعدئذٍ استخدام طرائق الميكانيك التقليدي المعروفة لحساب الأمكنة والسرعات النهائية للجسيمات للقينا مصاعب لايمكن تذليلها . فنحن نستطيع مبدئياً استخدام الطريقة المستعملة في حساب حركات الكواكب ، لكنها عملياً ستكون عديمة الجدوى وسنفضل عليها **الطريقة الإحصائية** التي تغنينا عن معرفة الحالات البدئية . فنحن لن نعرف عن الجملة في كل لحظة إلا القليل وسنكون جاهلين كل شيء عن ماضيها وعن مستقبلها . ولن نهتم بمصير كل جسيم من الغاز على حدة . إن مسألتنا ستكون من طبيعة أخرى ؛ فلن نسأل مثلاً عن « سرعة كل جسيم في اللحظة الراهنة » ، بل سنسأل : « كم جسيماً له سرعة محصورة بين ٣٠٠ و ٤٠٠ متر في الثانية ؟ » فنحن لن نهتم بالأفراد ؛ بل إن ما ننشده هو معرفة القيم الوسطية التي تميز المجموعة كلها . ومن الواضح أن المحاكات التي تستخدم الطريقة الإحصائية لايمكن أن تصح إلا إذا كان عدد الأفراد التي تتناولها الطريقة كبيراً .

فتطبيق الطريقة الإحصائية لن يتيح لنا أن نتنبأ عن سلوك فرد في جمهور . والذي نستطيع أن نتنبأ به هو **احتمال** أن يتصرف تصرفاً معيناً . فإذا كانت قوانيننا الإحصائية تفيد بأن ثلث عدد الجسيمات ذو سرعة محصورة بين ٣٠٠ و ٤٠٠ متر في الثانية فهذا يعني أننا لو كررنا قياساتنا عدة مرات على عدد كبير من الجسيمات لحصلنا بالفعل على هذا الوسطي ، أو بتعبير آخر ، لكان احتمال وجود جسيم ذي سرعة محصورة في ذلك المجال مساوياً الثلث .

فمعرفة نسبة المواليد إلى عدد السكان في بلد كبير لاتعني أننا سنعلم إذا كانت هذه العائلة بالذات ستسعد بولد هذه السنة ؛ بل تعني أننا نملك نتائج إحصائية لايلعب فيها الفرد أي دور .

لنفترض ، كمثال آخر ، أننا راقبنا لوحات عدد كبير من السيارات فاكتشفنا أن ثلث هذا العدد يحمل أرقاماً تقبل القسمة على ٣ . وعندئذٍ لانستطيع أن نؤكد أن السيارة التي ستمر بعد قليل تتمتع بهذه الصفة بل أن نقول إن احتمال أن تتمتع بها يساوي الثلث . فالقوانين الإحصائية لايمكن أن تنطبق إلا على التجمعات الكبيرة وليس على الأفراد التي تتألف منها هذه التجمعات .

والآن يمكننا العودة إلى مسألتنا الكمومية .

إن قوانين الفيزياء الكمومية ذات خاصية إحصائية . وهذا يعني أنها تنطبق ، لا على جملة منفردة ، بل على جمهرة جمل متماثلة تماماً ؛ ولايمكن التحقق من صحتها بقياس واحد في الجملة بل بسلسلة من القياسات المكررة .

إن التفكك الإشعاعي لبعض المواد هو واحد من الحوادث العديدة التي تحاول الفيزياء الكمومية أن تصوغ لها قوانين تنبيء عن التحول التلقائي لعنصر كيميائي إلى عنصر آخر . فنحن نعلم مثلاً أن غراماً واحداً من الراديوم يتفكك نصفه خلال ١٦٠٠ سنة ويبقى النصف الآخر كما هو عليه . وبذلك يمكن أن نعرف ، على وجه التقريب ، كم ذرة تتفكك خلال نصف الساعة القادمة ، ولكننا لانستطيع أن نقول ، حتى في التوصيف النظري لهذه الظاهرة ، لماذا كانت هذه الذرات بعينها هي التي تفككت وليس سواها . فبموجب معلوماتنا الحالية نعجز تماماً عن معرفة الذرات الإفرادية المحكوم عليها بالذات أن تتفكك . فمصير إحدى الذرات بعينها لايتعلق بعمرها . ونحن لانملك أي أثر لقانون يتحكم بسلوك الذرة المنفردة . وعلى هذا لايمكننا أن نصوغ سوى قوانين إحصائية ، قوانين تتحكم بجمهرة كبيرة من الذرات .

لنضرب مثلاً آخر . إن عنصراً غازياً مضيئاً موضوعاً في المطياف لايصدر خطوطاً طيفية ذات طول موجة محدد . فظهور سلسلة متقطعة من الأطوال الموجية المعينة هو خاصية للظواهر الذرية تنبيء عن وجود سلسلة من الكموم العنصرية . لكن هذه الظاهرة لها خاصة أخرى : إن بعض هذه الخطوط الطيفية شديدة النور جداً وبعضها الآخر ضعيف هزيل . فالخط القوي يعني أنه قد صدر عدد كبير نسبياً من الفوتونات المنتمية إلى طول الموجة الخاص بهذا الخط . أما الخط الضعيف فيعني أنه قد صدر عدد صغير نسبياً من الفوتونات المنتمية إلى طول الموجة الخاص بهذا

الخط . وهنا أيضاً تقدم نظرية الكموم نصوصاً ذات صيغة إحصائية فحسب . **فالخط الطيفي** ناجم عن انتقال الذرة من مستوى طاقي إلى مستوى طاقي آخر أخفض منه . **فالنظرية تتكلم فقط** عن احتمال حدوث كل من هذه الانتقالات الممكنة ، لكنها لاتقول شيئاً عن **الانتقال الواقعي لذرة** مفردة . إنها تعمل بنجاح رائع لأنها تتناول ظاهرة تحدث في جمهرة كبيرة من الذرات ، لا في ذرة واحدة منفردة .

قد نتوهم للوهلة الأولى أن الفيزياء الكمومية الجديدة تشبه النظرية الحركية للمادة ، لأن كلتيهما ذات صبغة إحصائية ولأن كلاً منهما تتناول جملاً تتألف من جمهرة كبيرة من الأفراد . لكن الأمر ليس كذلك . فليس من المهم ، في هذا التشبيه ، أن نعرف نقاط اللقاء فقط ، بل أن نعرف نقاط الاختلاف أيضاً . إن نقاط اللقاء ، بين النظرية الحركية للمادة ونظرية الكموم ، تنحصر مبدئياً في السمة الإحصائية لكل منهما . أما الفروق فنشرحها فيما يلي .

إذا رغبنا في أن نعلم عدد الرجال والنساء الذين تزيد أعمارهم عن عشرين سنة في مدينة ما ، نطلب من كل مواطن أن يملأ جدولاً يحمل الحقول الثلاثة : « ذكر » ، « أنثى » ، « العمر » . وبعد تجميع هذه المعلومات التي نفترضها صحيحة ، نحصل بالعد والتصنيف على نتيجة ذات صبغة إحصائية . ولن نهتم بالأسماء والعناوين التي ترد في الجدول . فمعلوماتنا الإحصائية هنا قد حصلنا عليها بعد فحص كل حالة شخصية مفردة . وكذلك الأمر في النظرية الحركية للمادة ، فنحن نحصل فيها على قوانين إحصائية تتحكم بجمهور الذرات ولكنها تنجم عن قوانين تتحكم في سلوك الأفراد .

أما في الفيزياء الكمومية فالأمر مختلف تماماً . فالقوانين الإحصائية هنا معطاة سلفاً ؛ أما الأفراد فمهملة . ففي نموذج الفوتون ، أو الالكترون ، والثقبين رأينا أننا لانستطيع أن نعمل كما كنا نعمل في الفيزياء التقليدية بخصوص حركة الجسيمات في المكان وفي الزمان . إن الفيزياء الكمومية لاتحسب حساب القوانين التي تتحكم في سلوك الجسيم الفرد ، بل تضع ، **مباشرة** ، القوانين الإحصائية التي تنبئ عن سلوك الجماهير . فمن المستحيل ، حسب الفيزياء الكمومية ، أن نعلم في لحظة واحدة مكان الجسيم وسرعته وأن نتنبأ بمساره المستقبلي بالشكل الذي كنا نفعله في الفيزياء التقليدية . إن الفيزياء الكمومية تتناول مجموعات الجسيمات ، **فهي علم يهتم بالجماهير ولايحسب حساب الأفراد** .

إن أحكام الضرورة ، لا النزوة ولا الرغبة في التجديد ، هي التي تجبرنا على هجر الصورة التقليدية ، لأن المصاعب التي نعانيها فيها لاتقتصر على مجال ظاهرة الانعراج من خلال الثقبين أو من خلال الفجوات في البلورة فحسب ، بل إننا نعانيها أيضاً في ظواهر أخرى عديدة لامجال لذكرها هنا . إن تغيير الرؤية يفرض علينا نفسه باستمرار كلما حاولنا التعمق في معرفة الواقع . لكن الأمر يظل متروكاً للمستقبل ، فهو الذي سيحكم وسيكشف فيما إذا كنا قد اخترنا الطريق الممكن الوحيد ، أو أن ثمة طريقاً آخر يقدم حلاً لهذه المصاعب .

لقد اضطررنا إلى هجر توصيف الحالات المنفردة على أساس أنها حوادث موضوعية في المكان وفي الزمان وإلى إدخال قوانين إحصائية . تلك هي الخصائص الرئيسية للفيزياء الكمومية الحديثة .

هذا وقد كنا ، أثناء رسم صورة جديدة للواقع كصورتي الحقل الكهرطيسي والحقل الثاقلي ، نجتهد في أن نشير بنصوص عامة إلى السمات الأساسية للمعادلات التي تشكل صيغاً رياضية لتلك الصور والأفكار . ونريد الآن أن نفعل الشيء ذاته في نظرية الكم ، وذلك بالاعتماد على أفكار بور ودبروي وشرودنغر Schrodinger وهايزنبرغ Heisenberg وديراك Dirac وبورن Born .

لنعتبر حالة الكترون واحد . قد يكون تحت تأثير حقل كهرطيسي خارجي أو حراً من كل تأثير خارجي . وقد يتحرك في حقل نواة ذرية مثلاً ، أو ينعرج بواسطة بلورة . إن فيزياء الكموم تعلمنا كيف نصوغ المعادلات الرياضية لأية مسألة من هذه المسائل .

لقد شرحنا التشابه الموجود بين الوتر المهتز وغشاء الطبل والآلة النفخية وبقية الآلات الصوتية ، من جهة ، والذرة المشعة للضوء من جهة أخرى . ويوجد أيضاً شيء من التشابه بين المعادلات الرياضية التي تحكم الظواهر الصوتية والمعادلات الرياضية التي تحكم مسائل الفيزياء الكمومية . بيد أن التفسير الفيزيائي لما يحدث فيهما هو ، هنا أيضاً ، مختلف من مجال لآخر . فالمقادير الفيزيائية التي تصف الوتر المهتز تختلف عن تلك التي تصف الذرة المشعة ، رغم وجود بعض أوجه التشابه بين المعادلتين الرياضيتين . ففي حالة الوتر المهتز نسعى لمعرفة انحراف نقطة من الوتر عن مكانها المعتاد في لحظة ما . فإذا علمنا شكل الوتر المهتز في لحظة ما نستطيع معرفة كل ما نود معرفته ؛ فالانحراف عن الوضع النظامي يمكن أن يحسب ، في أية لحظة ، بواسطة المعادلات الرياضية للوتر المهتز . إن علاقة انحراف النقطة ، عن وضعها النظامي ، بمكان هذه النقطة من الوتر يمكن أن نعبر عنها بدقة كما يلي : إن الانحراف ، في لحظة معينة ، عن القيمة النظامية هو تابع

لإحداثيات نقطة الوتر ؛ وكل نقاط الوتر تشكل متصلاً ذا بعد واحد ، والانحراف معين في هذا المتصل وهو يحسب بواسطة المعادلات الرياضية للوتر المهتز .

وبطريقة مماثلة نعرف ، في حالة الالكترون ، تابعاً لنقطة من الفضاء في لحظة ما ، نسمي هذا التابع **موجة الاحتمال** . وموجة الاحتمال هنا تقابل الانحراف عن الوضع النظامي في حالة الوتر ؛ بينما هي هناك وفي لحظة معينة تابع في متصل ذي بعد واحد . إن موجة الاحتمال هي كراس يحوي كل المعلومات عن الجملة الكمومية المدروسة . وتجعلنا قادرين على الإجابة عن كل الأسئلة المعقولة التي تخص هذه الجملة : لكنها لاتعطي ، في لحظة معينة ، مكان الالكترون وسرعته لأن هذه المسألة عديمة المعنى في الفيزياء الكمومية . بل إنها تعطي احتمال العثور على الالكترون في مكان معين ، أو هي تدل على المكان الذي نملك أكبر حظ للعثور عليه فيه . وهذا يعني أننا لو قمنا بعدد كبير من عمليات البحث عن الالكترون في النقطة المختارة لكانت نسبة عدد المرات التي نعثر عليه فيها على عدد المحاولات الكلي مساوية الاحتمال المحسوب من موجة الاحتمال . فمعادلات الفيزياء الكمومية تعين موجة الاحتمال ، تماماً ، كما تعين معادلات مكسويل الحقل الكهرطيسي وكما تعين معادلات التثاقل حقل التثاقل في نقطة ، فقوانين فيزياء الكم هي أيضاً قوانين بنية . لكن معاني المفاهيم الفيزيائية الواردة في معادلات الكموم هي أكثر تجريداً من معاني المفاهيم الواردة في معادلات الحقول . فهي لاتقدم سوى الوسائل الرياضية للإجابة عن أسئلة ذات صبغة إحصائية .

لقد فحصنا حتى الآن حالة الكترون واحد في حقل خارجي . لكننا ، بدلاً من ذلك ، لو كنا إزاء شحنة كبيرة من مليارات الالكترونات لجاز لنا أن نهمل نظرية الكم برمتها وأن نحل المسألة خارج نطاق النظرية . فعندما نكون إزاء تيار في سلك ، أو نواقل مشحونة أو أمواج كهرطيسية ، نستطيع تطبيق فيزياء ما قبل الكم المحتواة في معادلات مكسويل . ولكننا لايحق لنا ذلك في المفعول الفوتوكهربائي ولا في حساب شدة الخطوط الطيفية ولا في النشاط الإشعاعي ولا في انعراج الأمواج الكهرطيسية ولا في ظواهر عديدة أخرى تتجلى فيها الخواص الكمومية للمادة وللطاقة . بل علينا عندئذٍ أن نصعد إلى طابق أعلى ، إن صح هذا التعبير . فبينما كنا نتكلم ، في الفيزياء التقليدية ، عن أماكن الجسيم وسرعته أصبحنا الآن ملزَمين بأن نأخذ بعين الاعتبار أمواج الاحتمال في متصل ثلاثي الأبعاد يوجد فيه الجسيم .

إن الفيزياء الكمومية تقدم وصفتها الخاصة في معالجة المسألة الكمومية عندما نعرف كيف نعالج مسألة مماثلة في إطار الفيزياء التقليدية .

فمن أجل جسيم عنصري كالالكترون والفوتون ، لدينا أمواج احتمال في متصل ثلاثي الأبعاد ؛ وهذه الأمواج صفة مميزة لسلوك الجملة الإحصائي ، لو كررنا التجربة عدة مرات . ولكن ماذا يحدث عندما نكون إزاء جسيمين ، بدلاً من جسيم واحد ، متفاعلين فيما بينهما ، الكترونين ، أو الكترون وفوتون ، أو الكترون ونواة ؟ فنحن لايحق لنا أن نعالج كلاً من الجسمين على حدة وأن نمثل كلاً منهما بموجة احتمال ذات ثلاثة أبعاد ، وذلك بسبب التفاعل المتبادل بينهما . على أنه ليس من الصعب أن نتكهن بطريقة تمثيل جملة من الجسيمات المتفاعلة فيما بينها في الفيزياء الكمومية . فعلينا في البدء أن ننزل إلى الطابق الأخفض أي أن نعود إلى الفيزياء التقليدية . فمكان الجسيمين الماديين ، في الفضاء وفي لحظة معينة ، يتعين بستة أعداد : ثلاثة إحداثيات لكل منهما . فمجموعة الأوضاع الممكنة للجسيمين تشكل متصلاً ذا ستة أبعاد ، وليس ثلاثة كما في حالة جسيم واحد . وإذا عدنا فصعدنا إلى الطابق الأعلى ، إلى فيزياء الكم ، نجد موجة احتمال في متصل ذي ستة أبعاد ، لاثلاثة . وهكذا ، فمن أجل ثلاثة جسيمات أو أربعة أو أكثر نجد أمواج احتمال هي توابع في متصل ذي تسعة أبعاد أو اثني عشر أو أكثر .

إن هذا يُظهر بشكل واضح أن أمواج الاحتمال مفاهيم أكثر تجريداً من الحقلين الكهرطيسي والتثاقلي اللذين يتمتعان بوجود محسوس وينتشران في فضاء ذي ثلاثة أبعاد . أما المتصل ذو الأبعاد العديدة فهو أرضية أمواج الاحتمال ، وهذه الأرضية لايمكن أن تنطبق على الفضاء الثلاثي الأبعاد المألوف إلا في حالة جسيم واحد . لكن المغزى الفيزيائي الوحيد لموجة الاحتمال هو أنها تتيح الإجابة عن أسئلة إحصائية معقولة تتناول عدة جسيمات أو جسيماً واحداً على حد سواء . ففي حالة جسيم واحد مثلاً يمكن أن نسأل : ما هو احتمال العثور على الجسيم في مكان محدد ؟ وفي حالة جسيمين يمكن أن نسأل : ما هو احتمال العثور على الجسيمين في مكانين محددين وفي لحظة محددة ؟

إن الخطوة الأولى التي خطوناها لنبتعد عن الفيزياء التقليدية هي هجر وصف الحالات المفردة بأنها حوادث موضوعية في المكان وفي الزمان . وقد اضطررنا إلى استخدام الطريقة الإحصائية التي تقدمها أمواج الاحتمال . وبمجرد أن بدأنا سلوك هذا الدرب اضطررنا للذهاب إلى مدى بعيد على طريق التجريد ، وقد استوجب ذلك أن ندخل أمواج احتمال ذات أبعاد عديدة تتعلق بعدة جسيمات .

وبهدف اختصار الكلام سنعمد بعد الآن إلى إطلاق اسم الفيزياء التقليدية على كل ما هو غير كمومي . فالفيزياء التقليدية والفيزياء الكمومية مختلفتان جذرياً . الفيزياء التقليدية تهدف إلى

توصيف الأشياء الموجودة في المكان والزمان وإلى صوغ قوانين تنبيء عن تغيرها بمرور الزمن . لكن الظواهر التي كشفت لنا أن المادة والإشعاع مؤلفان من جسيمات وأمواج وأن الحوادث العنصرية ، كالنشاط الإشعاعي والانعراج وإصدار الخطوط الطيفية وسواها من الظواهر ، قد دعتنا إلى التخلي عن هذه الصورة . والفيزياء الكمومية لاتهدف إلى وصف الأشياء منفردة في المكان ولا إلى تغيرها في الزمان ، وليس فيها مكان للمقولات التي مثل : « إن هذا الشيء كيت كيت وله الخاصة كيت وكيت » ، لكنها تضع في مكانها مقولات مثل : « إن احتمال أن يكون هذا الشيء كيت وكيت وأن تكون له الخاصة كيت وكيت يساوي كذا وكذا » . لايوجد في الفيزياء الكمومية مكان لقوانين تنبيء عن تغيرات الشيء الفرد في الزمان ، بل يوجد في مكانها قوانين تنبيء عن تغيرات الاحتمال بمرور الزمن . إن هذه الطفرة الجوهرية ، التي أحدثتها نظرية الكموم في الفيزياء ، قد مكنت من إيجاد تفسير مقبول للخاصية التقطيعة والإحصائية التي تتسم بها الحوادث المنتمية إلى مجال الظواهر التي تكشف عن وجود كموم عنصرية للمادة وللإشعاع .

لكننا نصادف على هذا الطريق مصاعب جديدة أشد هولاً ؛ ولم نتمكن حتى الآن من تذليلها بشكل نهائي . ونود الآن أن نذكر بعضاً منها فقط . فالعلم لم يكن قط ولن يكون أبداً كتاباً منجزاً . وكل تقدم مهم يقود إلى اكتشاف مشاكل جديدة . وكل تطور انقلابي سيصادف ، عاجلاً أو آجلاً ، عقبات جديدة أصعب فأصعب .

لقد عرفنا ، في حالة جسيم واحد أو عدة جسيمات ، أننا نستطيع المرور من التوصيف التقليدي إلى التوصيف الكمومي ، من التوصيف الموضوعي للحوادث في المكان وفي الزمان إلى أمواج الاحتمال . لكن القارىء يتذكر الأهمية العظيمة لمفهوم الحقل في الفيزياء التقليدية . فكيف نستطيع شرح التفاعل بين كموم المادة والحقل ؟ فإذا كنا نحتاج ، في التوصيف الكمومي لسلوك عشرة جسيمات ، إلى موجة احتمال ذات ثلاثين بعداً فإننا سنحتاج في التوصيف الكمومي للحقل ، إلى موجة احتمال ذات عدد لامنته من الأبعاد . وعلى هذا فإن الانتقال من المفهوم التقليدي للحقل إلى المسألة المقابلة له في الفيزياء الكمومية عملية على جانب كبير من الصعوبة . فالصعود إلى الطابق الأعلى هنا مهمة شاقة جداً . ولم نقع ، حتى الآن وفي كل محاولاتنا ، على حل مرض لهذه المسألة . وثمة أيضاً مسألة هامة أخرى . لقد كنا في محاكاتنا السابقة ، بخصوص المرور من الفيزياء التقليدية إلى الفيزياء الكمومية ، نستخدم فيزياء ما قبل النسبية حيث يعالج كل من المكان والزمان على حدة ، بيد أننا لو حاولنا أن نبدأ التوصيف التقليدي بما توجبه نظرية النسبية فإن الصعود إلى

الفيزياء الكمومية يصبح أكثر تعقيداً بكثير . وهذه مسألة أخرى تناولتها الفيزياء الحديثة ولكنها ما تزال بعيدة عن إيجاد حل كامل مرض لها . وهناك فوق ذلك صعوبة تشكيل فيزياء متماسكة للجسيمات الثقيلة داخل نواة الذرة ؛ فرغم تراكم العديد من المعطيات التجريبية ورغم كل محاولات إلقاء الضوء على المسألة النووية فإننا ما نزال في الظلام بخصوص المسائل الأساسية في هذا المجال .

على أن مما لاريب فيه أن الفيزياء الكمومية قد فسرت تشكيلة غنية من الوقائع وأنها توصلت ، في غالبيتها ، إلى اتفاق رائع مع التجربة . وبذلك تكون قد زادت في ابتعادنا عن الصورة الميكانيكية القديمة لدرجة يكاد يتعذر علينا بعد الآن الرجوع منها إلى الوراء . بيد أن مما لاريب فيه أيضاً أن الفيزياء الكمومية ما تزال تعتمد على مفهومي المادة والحقل ، فهي ، بهذا المعنى ، نظرية مثنوية لاتقربنا خطوة واحدة من حل مسألتنا القديمة في إرجاع كل شيء إلى مفهوم الحقل .

هل تستمر الفيزياء في السير على الخط الذي اعتمدته الفيزياء الكمومية ، أم أنها ما تزال تملك حظاً كبيراً في اكتشاف أفكار جديدة ثورية ؟ هل سنصادف على طريق التقدم انعطافاً حاداً جديداً ، كما حدث مراراً في تاريخ هذا العلم ؟

إن كل المصاعب التي تلاقيها النظرية الكمومية قد تركزت ، في السنين الأخيرة ، حول عدد قليل من النقاط الجوهرية . والفيزياء تنتظر حلها على أحر من الجمر . لكننا لانستطيع أن نتنبأ متى وكيف سيحدث ذلك .

الفيزياء والحقيقة

ما هي النتائج التي يمكن أن نستخلصها من تطور الفيزياء المشروح هنا بخطوطه العامة والذي يعرض الأفكار الأساسية فقط ؟

إن العلم ليس تجميع قوانين ولاسرد وقائع ليس بينها صلة . إنه بناء متواصل ينشئه الذهن البشري من أفكاره ومن مفاهيمه المخترعة بكل حرية . والنظريات الفيزيائية تسعى لرسم صورة للحقيقة ولربطها بعالم انطباعاتنا الحسية الواسع . وعلى هذا فإن منشآتنا الذهنية تتبرر حصراً بمقدار متانة وصدق الروابط التي تحوكها نظرياتنا بين تلك الصورة وذلك العالم .

لقد رأينا حقائق جديدة برزت أثناء تقدم الفيزياء . على أننا يمكن أن نصعد هذه السلسلة من النشاط الخلاق إلى ما قبل بدء علم الفيزياء . فمفهوم الغرض من أول المفاهيم البدائية . فالمفاهيم التي مثل الشجرة والحصان والجسم المادي هي كائنات تستند على أساس من التجربة رغم أنها تتولد

من أحاسيس بدائية إذا قورنت بعالم الظواهر الفيزيائية . فالهر الذي يمكر بالفأر يخلق لنفسه بالفكر حقيقة بدائية . ومن واقع أن الهر يتصرف دوماً تصرفاً واحداً إزاء كل فأر يصادفه نستنتج أن الهر يشكل مفاهيم ونظريات يستهدي بها في عالم انطباعاته الحسية الخاص به .

إن « ثلاث شجرات » شيء يختلف عن « شجرتين » . كما أن « شجرتين » و « حجرين » شيئان مختلفان . إن مفاهيم الأعداد المجردة ، ٢ ، ٣ ، ٤ ، ... ، المستخلصة من الأغراض التي ولدتها ، هي إبداعات الذهن البشري على طريق توصيف حقائق العالم الذي نعيشه .

إن الشعور الداخلي الذاتي بالزمن يتيح لنا أن نسلسل انطباعاتنا وأن نؤكد أن هذا الحادث يقع قبل ذاك ، لكن ربط كل لحظة من الزمن بعدد ، عن طريق استخدام الميقاتية ، هي اختراع يجعل من الزمن متصلاً وحيد البعد . والأمر كذلك أيضاً فيما يخص مفاهيم الهندسة الإقليدية ، ومفاهيم الهندسة اللا إقليدية ، في فضائنا الذي نعتبره متصلاً ذا ثلاثة أبعاد .

لقد بدأت الفيزياء فعلياً باختراع مفهوم الكتلة ومفهوم القوة ومفهوم المرجع العطالي . وهي كلها اختراعات حرة ؛ وقد أفضت إلى الصورة الميكانيكية . ففيزيائي القرن التاسع عشر يرى أن حقيقة عالمنا الخارجي هي الجسيمات والقوى البسيطة العاملة فيما بينها والتي تتعلق بالمسافة فقط . بيد أن الصعوبات التي نشأت من انحراف الإبرة المغنطيسية وتلك التي تتعلق ببنية الأثير قد قادتنا إلى خلق حقيقة أكثر تطوراً ظهر فيها الاختراع الهام للحقل الكهرطيسي . وقد استلزم ذلك خيالاً علمياً جريئاً تعلمنا بواسطته أن المهم ليس سلوك الأجسام بل سلوك شيء يقع فيما بينها ، أي الحقل ؛ وهذا الاختراع قد يكون أساسياً عندما نريد أن نسلسل الحوادث ونفهمها .

ثم حدثت تطورات لاحقة هدمت المفاهيم القديمة وخلقت مفاهيم جديدة . فقد قادت نظرية النسبية إلى هجر الزمان المطلق الشامل والمرجع العطالي . فأرضية كل الحوادث لم تعد تتمثل بالزمن الوحيد البعد ولا بالفضاء الثلاثي الأبعاد بل بالمتصل المكاني ـــ الزماني الرباعي الأبعاد ، وهو اختراع حر أيضاً ، وأصبح لدينا قانون تحويل جديد . كما أن المرجع العطالي لم يعد ضرورياً . فأصبح كل مرجع ، مهما كان ، قادراً على أن يخدمنا في توصيف حوادث الطبيعة .

ثم جاءت نظرية الكموم التي ابتدعت بدورها صوراً جديدة وأساسية للحقيقة . فحل التقطع محل الاستمرار . وظهرت القوانين الاحتمالية بدلاً من القوانين التي تنبئ عن سلوك الفرد .

فصورة الحقيقة التي رسمتها الفيزياء الحديثة هي ، كما نرى ، بعيدة جداً عن الصورة البدئية . لكن هدف كل نظرية فيزيائية ما يزال كما كان .

إن النظريات الفيزيائية تفيدنا في تلمس طريقنا في متاهة الوقائع المرصودة ، في إيجاد تفسيرات تنبع من مفهومنا للحقيقة . ونحن لانستطيع أن نبني علماً دون أن نعتقد بإمكانية إدراك الحقيقة من خلال منشآتنا النظرية ودون أن نوقن بوجود تناغم داخلي في العالم الذي نرصده . إن هذا الإيمان كان وسيظل الباعث الرئيسي لكل إبداع علمي . فمن خلال كل مجهوداتنا ، وفي كل صراع مأساوي بين الصور القديمة والصور الجديدة ، نلمح الطموح إلى الفهم والإيمان الراسخ بتناغم عناصر الوجود ، ذلك الإيمان الصامد أمام كل العقبات التي تحول دون إدراك الحقيقة .

وبمختصر القول :

إن التشكيلة الفنية للوقائع الفيزيائية في عالم الذرة تجبرنا على اختراع مفاهيم فيزيائية جديدة . إن للمادة بنية حبيبية ؛ إنها تتألف من جسيمات عنصرية : الكموم العنصرية للمادة . وللشحنة الكهربائية بنية حبيبية ــ وهذا أمر هام جداً في نظرية الكموم ــ وكذلك أمر الطاقة . فالفوتونات هي كموم الطاقة التي يتألف منها الضوء .

هل الضوء موجة أم وابل فوتونات ؟ هل الأشعة الالكترونية وابل من الجسيمات العنصرية أم موجة ؟ إن هذه الأسئلة الجوهرية تفرضها التجربة على الفيزياء . ولدى البحث عن الأجوبة لابد من أن نتخلى عن توصيف الظواهر الذرية على أساس أنها تحدث في المكان وفي الزمان ، ويجب أن نبتعد أكثر فأكثر عن الصورة الميكانيكية القديمة . إن الفيزياء الكمومية تصوغ قوانين تنبئ عن سلوك الجماعات لا عن سلوك الأفراد . فهي لاتقدم الخواص بل تعطي احتمالاتها . إنها لاتصوغ قوانين تكشف عن مستقبل الجملة بل قوانين تنبئ عن تغيرات الاحتمالات في الزمان وتختص بسلوك الجماعات الكثيرة الأفراد .

المحتــوى

تطور الأفكار في الفيزياء: من المفاهيم الأولية إلى نظريتي النسبية والكم ـــ L'evolution des idées en physique/ألبرت أينشتاين، ليوبولــد انفلــد، ترجمه عن الفرنسيــة أدهـــم السمان. طـ٢. ـــ دمشق: دار طلاس، ١٩٩٢. ـــ ٢١٣ ص: مص؛ ٢٤ سم.

١ ـــ ١ر٥٣٠ أ ي ن ت ٢ ـــ العنوان ٣ ـــ أينشتاين ٤ ـــ أنفلد ٥ ـــ السمان

رقم الإيداع ـــ ١٩٩٢/١/٢١٧

رقم الإصدار ـــ ٥٥٩

□ هذا الكتاب ليس درساً منهجياً يشرح الوقائع والنظريات الفيزيائية الأولية.. إنه رسم بالخطوط العريضة لمحاولات الفكر البشري في إيجاد الصلة بين عالم الأفكار وعالم الظواهر.

□ إنه حوار بسيط والحكم عليه متروك لكم، هل هو ممل أم جذّاب؟ باهت أم مثير؟ ونكون قد بلغنا هدفنا إذا أتيح لهذه الصفحات أن تعطيكم فكرة عن الكفاح المتواصل الذي يبذله الفكر البشري الخلاق كي يتوصل بشكل كامل لفهم القوانين التي تحكمه الظواهر الفيزيائية.

□ إنه كتاب علمي متميز بالتبسيط، ولكنه يجب أن لا يقرأ كما تقرأ الرواية. ———————— •

(من المقدمة)